ISSN 2181-7383

O'zbekiston KONCHILIK XABARNOMASI

3
№ 102
ILMIY-TEXNIK VA ISHLAB CHIQARISH JURNALI
Iyul - Sentabr 2025

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ГОРНЫЙ ВЕСТНИК УЗБЕКИСТАНА

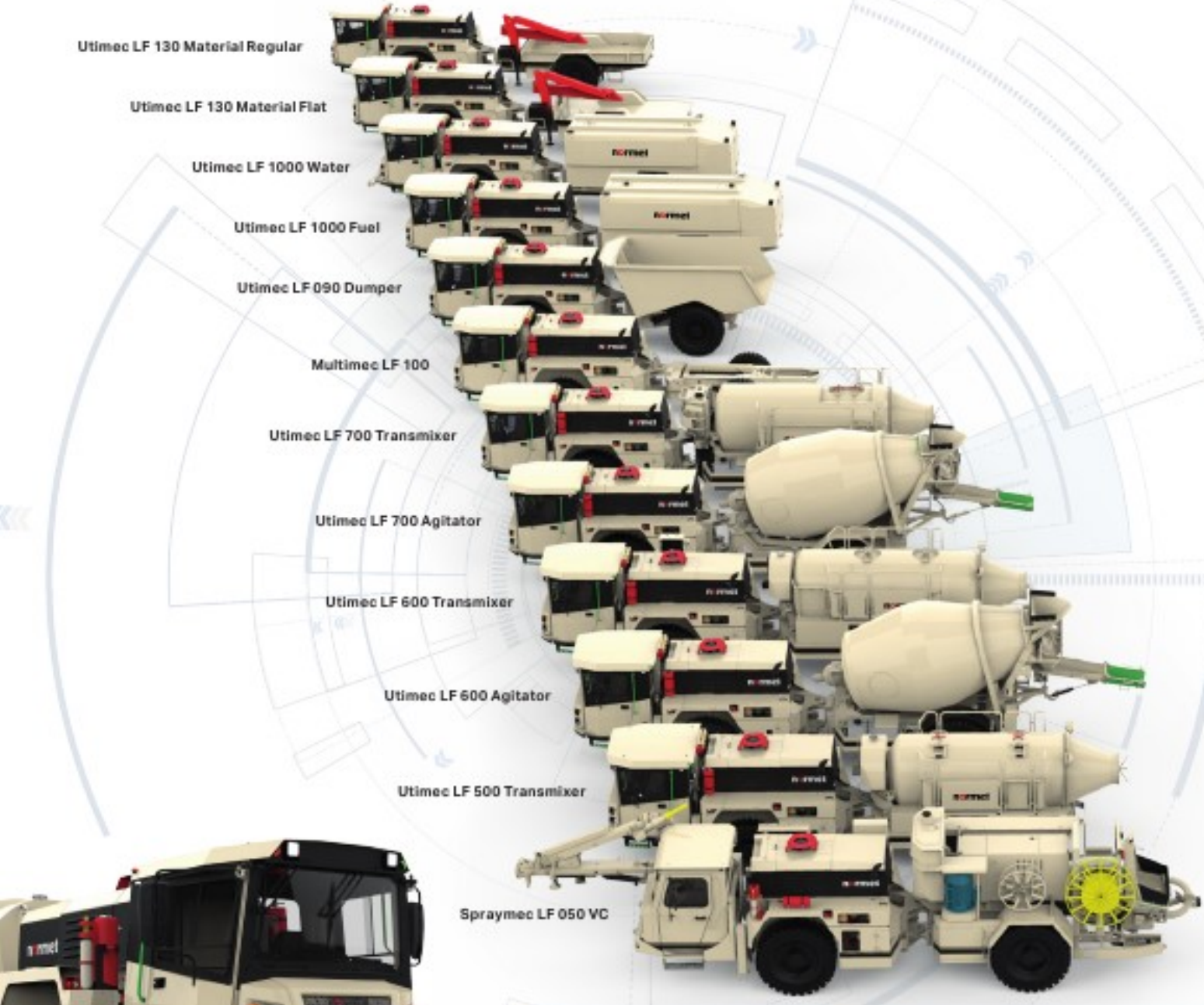
O'zbekiston KONCHILIK XABARNOMASI ГОРНЫЙ ВЕСТНИК Узбекистана № 3 (102) Июль - Сентябрь 2025

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.
Представительство в Республике Узбекистан, 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 quvvatlovchilar:
«Navoiy KMK» AJ

Bosh muharrir:
U.Z. Sharafutdinov

Bosh muharrir o‘rinbosari:
Sh.Sh. Alikulov

Texnik va badiiy muharrir:
F.Yu. Zairova

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

Tahririyat manzili:
210100, Navoiy shahri, Navoiy ko‘chasi, 27 uy
«NKMK» AJ Innovatsion rivojlanish departamenti JaTYEBIM
Tel.: +99879 227-81-59

E-mail: FY.Zairova@ngmk.uz, U.Sharafutdinov@ngmk.uz

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

Muqova, dizayn, terish bo‘yicha mas’ul:
F.Yu. Zairova

Jurnalning chop etilishi va elektron shaklini yangilab boruvchi mas’ul:
U.Z. Sharafutdinov

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 20.09.2025 y. imzolandi
A3 formatda. Adadi 100 nusxa

Научно-технический и производственный журнал, издаётся с июля 1997 года, выходит четыре раза в год.

Учредители:
АО «Навоийский горно-металлургический комбинат», Навоийский государственный горно-технологический университет, Узбекский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт геотехнологии и цветной металлургии ООО «O‘zGEORANGMETLITI»

При финансовой поддержке:
АО «Навоийский ГМК»

Главный редактор:
Шарафутдинов У.З.

Зам. главного редактора:
Аликулов Ш.Ш.

Технический и художественный редактор:
Заирова Ф.Ю.

Журнал зарегистрирован в Узбекском Агентстве по печати и информации. Регистрационное свидетельство за № 0033 от 13 декабря 2006 г. ISSN 2181-7383 рег. № 01-22/37 S от 09.07.2013 г.

Адрес редакции:
210100, г. Навои, ул. Навои, 27
ИЦВНТ Департамента инновационного развития АО «НГМК»
Тел.: +99879 227-81-59

E-mail: FY.Zairova@ngmk.uz, U.Sharafutdinov@ngmk.uz

Веб-сайт: http://www.gorniyvestnik.uz

Обложка, дизайн, компьютерная вёрстка:
Заирова Ф.Ю.

Ответственный за публикацию и обновление электронной формы журнала:
Шарафутдинов У.З.

Отпечатано:
НГГТУ
210100, Навоийская область, Навои, ул. Галаба, 76В
Тел.: +998 (79) 223-23-32, +998 (79) 223-49-66

ISSN 2181-7383

Подписано в печать 20.09.2025 г.
Формат А3. Тираж 100 экз.

4 780010 201760 >

MUNDARIJA / ОГЛАВЛЕНИЕ

Scientific, technical and industrial journal
Scientific, technical and industrial journal

The journal has been published since July 1997
The journal has been published since July 1997
comes out once every three months

Founders: Joint-stock company «Navoi Mining and Metallurgical Combine», Navoi State Mining and Technology University, Uzbek Research and Design Institute of Geotechnology and Non-Ferrous Metallurgy LLC «UzGEORANGMETLITI».

The journal is registered in the Uzbek Agency for Press and Information. Registration certificate number 0033 from December 13, 2006 ISSN 2181-7383 reg. No. 01-22 / 37 S dated July 09, 2013.

Editorial address: 210100, Navoi, st. Navoi, 27, Innovation Center for the Introduction of New Technologies of the Department of Innovative Development of JSC «NMMC»
Tel.: +99879 227-81-59
E-mail: FY.Zairova@ngmk.uz, U.Sharafutdinov@ngmk.uz
Web site: http://www.gorniyvestnik.uz; http://uzjournals.edu.uz/gorvest
Indexing: Ulrich's Periodicals Directory
Printed: Navoi State Mining and Technological University 210100, Navoi region, Navoi, Galaba street, 76V
Tel.: +998 (79) 223-23-32, +998 (79) 223-49-66

CONTENTS

УДК 622.271.326 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.001

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ЗАБОЯ



Назаров З.С.,
доцент кафедры
«Горное дело» НГГТУ, к.т.н.

Буриев Ш.У.,
старший предподаватель кафедры
«Добыча и переработка руд редких и радиоактивных металлов»
НГГТУ

Жиянов А.Б.,
доцент кафедры
«Добыча и переработка руд редких и радиоактивных металлов»
НГГТУ, PhD

Maqolada yer osti qazilmalarini o‘z ichiga olgan tog‘ jinslari massivi chegaradan tashqari deformatsiyalanishining xususiyatlari ko‘rib chiqilgan. Bu xususiyatlar, avvalo, xarakterli chegaraviy deformatsiyalanish sohalari va tog‘ jinslarining qoldiq mustahkamligining shakllanishida namoyon bo‘ladi. Aniqlanishicha, σ_0 kuchlanishlar maksimal qiymatga r_{12} chegarasida — ya’ni chegaraviy deformatsiyalanish sohasi va yemirilish sohalari orasidagi chegarada erishadi. Tog‘ jinslarining mo‘rt yemirilishga moyilligi ortishi bilan boshqa shartlar o‘zgarmagan holda σ_0 kuchlanishlarning maksimal nuqtasi avvalgi darajada saqlanadi, biroq u jins massivi chuqurligiga siljiydi. Ishda yopiq yemirilish zonalari geomekanik model asosida tahlil qilinadi – bunda tog‘ jinslari bir jinsli va izotrop hisoblanadi hamda boshlang‘ich kuchlanish holati barcha yo‘nalishlarda bir xil deb olinadi. Tog‘ jinslarining reologik xususiyatlarini hisobga olgan holda, mustahkam jinslar asosida tuzilgan model qo‘llanilgan. Shuningdek, mustahkamlagichning reaktiv qarshiligi p va tog‘ jinslarining qoldiq mustahkamligi σ_0 yemirilish sohalarining o‘lchamlariga ta’siri baholanib, aniqlangan. Natijalarga ko‘ra, yemirilish zonalarining hajmi va radial siljimasi vaqt o‘tishi bilan nochiziqli qonuniyat bo‘yicha ortib boradi.

Kalit so‘zlar: *deformatsiya, yer osti qazilmasi, mustahkamlik, yemirilish, kuchlanish, muvozanat, relaksatsiya, reologik xususiyatlar, mo‘rtlik, siljish, geomekanika, reaktiv qarshilik, mustahkamlovchi qurilma, qazilma konturi.*

В статье рассмотрены особенности запредельного деформирования породных массивов, вмещающих горные выработки, заключающиеся прежде всего в образовании характерных областей запредельного деформирования и остаточной прочности горных пород. Установлено, что напряжения σ_0 имеют максимум на границе r_{12} раздела между областью допредельного деформирования и областями разрушения. С увеличением склонности горных пород к хрупкому разрушению максимум напряжений σ_0 при прочих равных условиях остаётся на прежнем уровне, но смещается в глубь породного массива. Рассмотрены замкнутые области разрушения, с применением геомеханической модели однородного изотропного массива с равнокомпонентным начальным напряженным состоянием сложенного твердыми породами по реологическим свойствам. Проведена оценка и установлено влияние реактивного сопротивления крепи p и величины остаточной прочности горных пород σ_0 на размеры областей разрушения, при этом, размеры областей разрушения и радиальные смещения со временем увеличиваются по нелинейному закону.

Ключевые слова*: деформация, горная выработка, прочность, разрушение, напряжение, равновесие, релаксация, реологические свойства, хрупкость, смещение, геомеханика, реактивное сопротивление, крепь, контур выработки.*

Особенности запредельного деформирования породных массивов, вмещающих горные выработки, заключаются прежде всего в образовании характерных областей запредельного деформирования и остаточной прочности горных пород, т. е. областей разрушения, охватывающих часть контура или весь контур горных выработок, как это показано на расчётной схеме (*рис. 1, а*).

Первый случай реализуется тогда, когда на до предельной стадии деформирования образовались локальные области концентрации напряжений в приконтурном массиве, связанные с формой контура или с неравнокомпонентным полем начальных напряжений. Образование локальных областей разрушения на отдельных участках контура выработки наблюдается также в неоднородных породных массивах, когда на контуре встречаются горные породы с пониженной прочностью.

Второй случай формирования областей разрушения охватывающих весь контур выработки, реализуется в условиях допредельного деформирования однородных породных массивов с равнокомпонентным полем начальных напряжений вокруг выработок, имеющих контур, близкий к круговому, т.е. в условиях осесимметричного допредельного деформирования.

Анализируя случай образования замкнутых областей разрушения, рассмотрим геомеханическую модель однородного изотропного массива с равнокомпонентным начальным напряженным состоянием сложенного породами первого типа (твёрдыми) по реологическим свойствам [1]. В данном массиве сооружается протяжённая заглубленная выработка с прямоугольным сводчатым поперечным сечением, закрепленная конструкцией крепи с реактивным сопротивлением *p*, Соответствующая расчётная схема для рассматриваемой плоской осесимметричной задачи показана на *рис. 1, а*.

В общем случае вокруг выработки образуются три характерные области деформирования и разрушения (*рис. 1, а*), соответствующие трём характерным участкам на полной диаграмме деформирования горных пород:

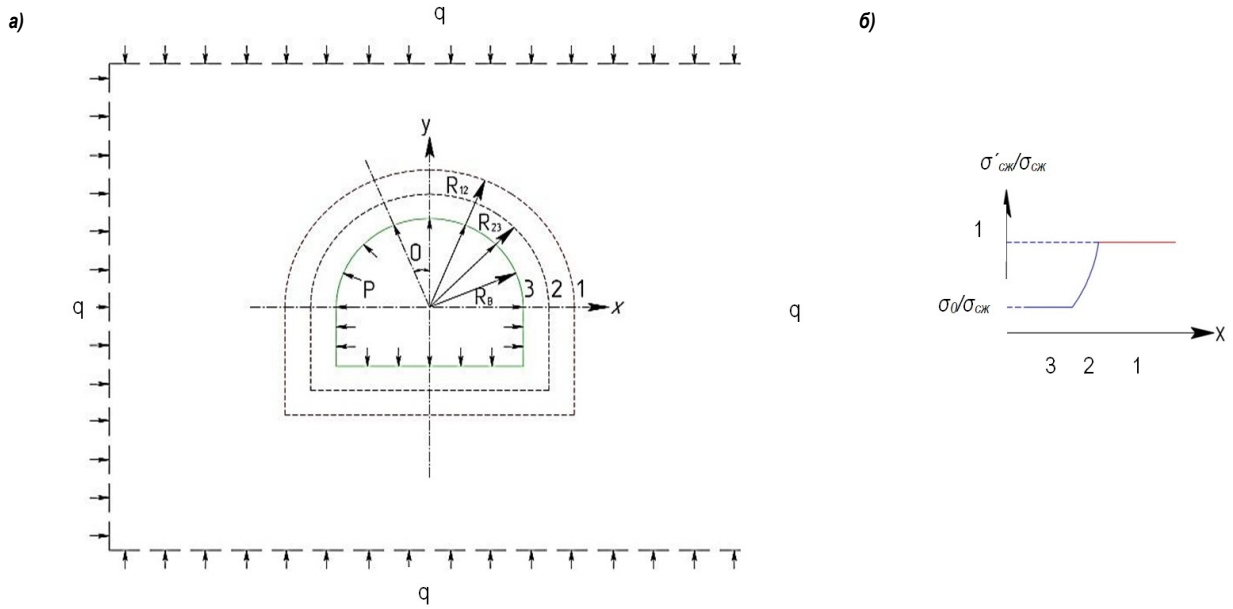


Рис. 1. Расчётная схема плоской задачи о запредельном деформировании породного массива (а) и распределение прочности породного массива вокруг выработки (б)

3 – примыкающая к контуру выработки область остаточной прочности, где породы перешли в состояние предельного равновесия с учётом их остаточной прочности σ_θ, или область руинного разрушения, когда $\sigma_\theta = 0$;

2 – область запредельного деформирования с постепенно возрастающей в глубь массива прочностью пород от σ_θ до предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$;

1 – остальная часть массива с прочностью пород $\sigma_{сж}$, находящаяся в состоянии допредельного деформирования.

На *рис. 1, б* показано изменение предела прочности горных пород на одноосное сжатие от максимального значения $\sigma_{сж}$ в области 1 до остаточной прочности σ_θ в области 3.

Границы раздела характерных областей, показанные на *рис. 1, а* пунктиром, имеют радиальные координаты:

R_B – контур выработки в проходке;

R_{23} – граница раздела между областями остаточной прочности и запредельного деформирования;

R_{12} – граница раздела между областями запредельного и допредельного деформирования.

В дальнейшем используются безразмерные радиальные координаты в единицах R_B, т. е. $r_в = 1$, $r_{23} = R_{23}/R_B$, $r_в = R_{12}/r_в$. При ограничении деформаций горных пород в выработанное пространство, что обычно достигается установкой конструкций крепи, области 3 и 2 или только область 3 могут не образовываться, т. е. реализуются случаи $r_{12} = 1$ или $r_{23} = 1$.

Исследованиями М.К. Теплова и С.В. Родоманцева [2] установлены различные скорости реологических процессов на этих стадиях: в частично разрушенных породах реологические процессы протекают быстрее, например, время релаксации на запредельной стадии $t/0$ меньше времени релаксации на допредельной стадии деформирования t_0 в 102-103 раз.

При малой продолжительности эксплуатации выработок ($t = t/0$) следует учитывать реологические процессы на запредельном стадии, а при длительной эксплуатации выработок ($t = t_0$) определяющими являются реологические процессы на до предельной стадии. Поскольку максимальная величина времени релаксации горных пород на запредельной стадии $t/0$ = 106 *с*, т. е. порядка 10 *сут*, всегда меньше срока службы капитальных выработок и подземных сооружений, который измеряется десятками лет, практическое значение для оценки устойчивости выработок имеет учёт реологических процессов на допредельной стадии деформирования. Для решения этой задачи воспользуемся соответствующими исследованиями В.Г. Хлопцова [3].

В области допредельного деформирования 1 для решения задачи имеем систему уравнений, включающую уравнения равновесия, неразрывности деформаций и физическое уравнение состояния пород первого типа, которое при μ = 0,5 преобразуется следующим образом:

$$\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial t} = \frac{3}{2E_0}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\sigma_0 - \sigma_r}{2}\right) + \frac{3}{2E_0 t_0}\left(\frac{\sigma_0 - \sigma_r}{2}\right) - \frac{E_\infty}{E_0 t_0}\varepsilon_0 q; \qquad (1)$$

где длительный модуль деформации E_∞ связан с мгновенным модулем деформации E_0 экспериментально установленным соотношением:

$$E_\infty / E_0 = \frac{\sigma_{сж\infty}}{\sigma_{сж}} = \frac{1}{\alpha}; \qquad (2)$$

$\sigma_{сж}$ и $\sigma_{сж\infty}$ – соответственно предел мгновенной и длительной прочности горных пород на одноосное сжатие.

Для решения задачи в полных напряжениях граничные условия в глубине массива при $r > \infty$, т. е. на внешней условной границе области 1, имеют вид (2), а на внутренней границе раздела $r = r_{12}(t)$, которая с течением времени эксплуатации t перемещается в глубь массива, граничные условия получим из условия предельного равновесия горных пород согласно прямолинейной огибающей предельных кругов Мора:

$$\sigma_\theta = (2\lambda + 1)\sigma_r + \sigma_{сж}(t); \qquad (3)$$

где $\lambda = \sin\rho/1\text{-}\sin\rho$ – коэффициент, который связан указанным соотношением с углом внутреннего трения горных пород ρ и который не следует смешивать с коэффициентом бокового распора λ;

$\sigma_{сж}(t)$ – снижающийся во времени предел прочности горных пород на одноосное сжатие, который аппроксимируется экспериментально установленной зависимостью:

$$\sigma_{сж}(t) = \sigma_{сж\infty} + (\sigma_{сж} - \sigma_{сж\infty})e^{-t/t_0}. \qquad (4)$$

Решая задачу при указанных граничных условиях, в итоге получим компоненты полных напряжений, деформаций и радиальных смещений в области допредельного деформирования:

$$\sigma_r = q - \frac{A(t)}{3}\frac{r_{12}^2(t)}{r_2}, \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = q + \frac{A(t)}{3}\frac{r_{12}^2(t)}{r_2}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r = \varepsilon_{\theta 12}(t)\frac{r_{12}^2(t)}{r_2}, \quad (7)$$

$$u = \varepsilon_{\theta 12}(t)\frac{r_{12}^2(t)}{r_2}, \quad (8)$$

где функция времени:

$$A(t) = 3\frac{2\lambda q + \sigma_{сж}(t)}{2(\lambda+1)}; \quad (9)$$

окружная деформация в массиве на границе раздела r_{12} в виде функции ремени:

$$\varepsilon_{\theta 12}(t) = \frac{A_\infty}{2E_\infty} + \left(\frac{A_0}{2E_0} - \frac{A_\infty}{2E_\infty}\right)e^{-\frac{tE_\infty}{t_0 E_0}}; \quad (10)$$

$$A_\infty = 3\frac{2\lambda q + \sigma_{сж}}{2(\lambda+1)};\ A_0 = 3\frac{2\lambda q + \sigma_{сж}}{2(\lambda+1)}; \quad (11)$$

В области запредельного деформирования 2 имеем систему уравнений, включающую уравнения равновесия, неразрывности деформаций и физическое уравнение, описывающее снижение прочности горных пород в этой области в зависимости от приращений запредельных деформаций ε/θ

$$\sigma_\theta = (2\lambda+1)\sigma_r + \sigma_{сж} - M_\infty \varepsilon_\theta', \quad (12)$$

где $M\infty$ длительный модуль спада горных пород при одноосном сжатии, определяемый экспериментально установленной зависимостью:

$$M_\infty = M_0\frac{\sigma_{сж\infty} - \sigma_0}{\sigma_{сж} - \sigma_0}, \quad (13)$$

где M_0 – мгновенный модуль спада при одноосном сжатии;

σ_0 – остаточная прочность горных пород на одноос ное сжатие.

Следует иметь в виду, что в уравнении (12) полные запредельные деформации с учётом (10) записываются следующим образом:

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta 12}(t) + \varepsilon_\theta',\quad \varepsilon_r = -\varepsilon_{\theta 12}(t) - \beta r_\theta', \quad (14)$$

где ε_θ – удвоенная величина коэффициента поперечной деформации на запредельной стадии деформирования, который определяется в условиях одноосного сжатия цилиндрических образцов горных пород.

Тогда, решая уравнение неразрывности деформаций и удовлетворяя граничным условиям ε/θ при $r = r_{12}$ получим выражение для приращений запредельных деформаций [4]:

$$\varepsilon_\theta' = \frac{2}{\beta+1}\varepsilon_{\theta 12}\left[\frac{r_{12}^{\beta+1}(t)}{r^{\beta+1}} - 1\right]. \quad (15)$$

Подставим (15) в физическое уравнение (12), предварительно записав компоненты напряжений через функцию напряжений, т. е. удовлетворив уравнению равновесия.

В итоге получим уравнение для определения функции напряжений и затем с её помощью выражения для компонентов напряжений. Окончательно запишем компоненты полных напряжений, деформаций и смещений в области запредельного деформирования 2:

$$\sigma_r = \sigma_{r_{23}}\left[\frac{r}{r_{23}(t)}\right]^{2\lambda} + \frac{2\varepsilon_{\theta 12}(t)M_\infty + (\beta+1)\sigma_{сж\infty}}{2\lambda(\beta+1)}\left[\left(\frac{r}{r_{23}(t)}\right) - 1\right] + \quad (16)$$

$$+\frac{2M_\infty \varepsilon_{\theta 12}(t)}{(\beta+1)(\beta+1+2\lambda)}\left[\left(\frac{r_{12}(t)}{r}\right)^{\beta+1} - \left(\frac{r_{12}(t)}{r_{23}(t)}\right)^{\beta+1}\left(\frac{r}{r_{23}(t)}\right)^{2\lambda}\right];$$

$$\sigma_\theta = (2\lambda+1)\sigma_r + \sigma_{сж\infty} - \frac{2M_\infty \varepsilon_{\theta 12}(t)}{(\beta+1)}\left[\left(\frac{r_{12}}{r}\right)^{\beta+1} - 1\right]; \quad (17)$$

$$\varepsilon_\theta = 2\varepsilon_{\theta 12}(t)\left\{\frac{1}{2} + \frac{1}{\beta+1}\left[\left(\frac{r_{12}(t)}{r}\right)^{\beta+1} - 1\right]\right\}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_r = -2\varepsilon_{\theta 12}(t)\left\{\frac{1}{2} + \frac{1}{\beta+1}\left[\left(\frac{r_{12}(t)}{r}\right)^{\beta+1} - 1\right]\right\}; \quad (19)$$

$$u = 2\varepsilon_{\theta 12}(t)\left\{\frac{1}{2} + \frac{1}{\beta+1}\left[\left(\frac{r_{12}(t)}{r}\right)^{\beta+1} - 1\right]\right\}r, \quad (20)$$

где σ_{r23} – напряжение σ_r, на границе раздела r_{23} *(t)* со стороны области остаточной прочности 3.

Если учесть, что приращения запредельных деформаций ε/θ на границе раздела r_{23} *(t)* имеют величину:

$$\varepsilon_\theta' = \frac{\sigma_{сж} - \sigma_0}{M_0} = \frac{\sigma_{сж\infty} - \sigma_0}{M_\infty}, \quad (21)$$

получим из выражения (21) соотношение между координатами $r_{12}(t)$ и r_{23} в виде:

$$\frac{r_{12}(t)}{r_{23}(t)} = \left[1 + \frac{(\sigma_{сж} - \sigma_0)(\beta+1)}{2M_0\varepsilon_{\theta 12}(t)}\right]^{\frac{1}{\beta+1}}, \quad (22)$$

где *p(t)* не является ранее принятым обозначением угла внутреннего трения .

В области остаточной прочности 3 для решения задачи имеем систему уравнений, которая включает уравнения равновесия и физическое уравнение [5]:

$$\sigma_0 = (2\lambda+1)\sigma_r + \sigma_0. \quad (23)$$

Интегрируя эту систему уравнений и удовлетворяя граничным условиям на контуре выработки:

$$\sigma_r = p \text{ при } r = 1 \quad (24)$$

где p – реактивное сопротивление крепи на контуре выработки, окончательно запишем компоненты полных напряжений:

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_\theta}{2\lambda} + p\right)r^{2\lambda} - \frac{\sigma_\theta}{2\lambda}, \quad (25)$$

$$\sigma_\theta = (2\lambda+1)\left(\frac{\sigma_\theta}{2\lambda} + p\right)r^{2\lambda} - \frac{\sigma_\theta}{2\lambda}, \quad (26)$$

Компоненты деформаций и смещений в области остаточной прочности определим из уравнения неразрывности деформаций с учётом несжимаемости разрушенной горной породы в этой области, т. е.:

$$\varepsilon_r'' = -\varepsilon_\theta'', \quad (27)$$

где ε_r'' и ε_θ'' – приращения деформаций в области остаточной прочности и граничных условий для деформаций на границе $r_{23}(t)$ согласно (18) и (22). В итоге получим:

$$\varepsilon_\theta = \frac{(1-\beta)(\sigma_{сж} - \sigma_\theta)}{2M_0} + \left[\varepsilon_{\theta 12}(t) + \frac{(\beta+1)(\sigma_{сж} - \sigma_\theta)}{2M_0}\right]\frac{r_{23}^2(t)}{r^2}, \quad (28)$$

$$\varepsilon_r = \frac{(1-\beta)(\sigma_{сж} - \sigma_\theta)}{2M_0} + \left[\varepsilon_{\theta 12}(t) + \frac{(\beta+1)(\sigma_{сж} - \sigma_\theta)}{2M_0}\right]\frac{r_{23}^2(t)}{r^2}, \quad (29)$$

$$u = \frac{(1-\beta)(\sigma_{сж} - \sigma_\theta)}{2M_0} + \left[\varepsilon_{\theta 12}(t) + \frac{(\beta+1)(\sigma_{сж} - \sigma_\theta)}{2M_0}\right]\frac{r_{23}^2(t)}{r^2}, \quad (30)$$

Положив в (24) $r = r_{23}$, получим граничное напряжение σr_{23}, входящее в формулы (16) и (17):

$$\sigma_{r23} = \left(\frac{\sigma_\theta}{2\lambda} + p\right) r_{23}^{2\lambda} - \frac{\sigma_\theta}{2\lambda}. \qquad (31)$$

Для определения координаты $r_{12}(t)$ приравняем напряжения σ_r в областях 1 и 2 на границе раздела $r_{12}(t)$. Получим следующее уравнение с учётом обозначений (22) и (31):

$$r_{12} = \left\{ \frac{2\lambda}{\sigma_\theta + 2\lambda p} \left[\frac{2M_\infty \varepsilon_{\theta 12}(t)}{(\beta+1)(\beta+1+2\lambda)} \left(\rho^{\beta+1+2\lambda} - 1\right) - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{2M_\infty \varepsilon_{\theta 12}(t) + \sigma_{сж\infty}(\beta+1)}{2\lambda(\beta+1)} \left(\rho^{2\lambda} - 1\right) + \frac{\sigma_\theta}{2\lambda}\rho^{2\lambda} + q\frac{A(t)}{3} \right] \right\}^{\frac{1}{2\lambda}} \qquad (32)$$

После вычисления координаты $r_{12}(t)$ из уравнения (32) координата $r_{23}(t)$ определяется из соотношения (22).

Если область остаточной прочности 3 не образовалась (r_{23}=1), координата $r_{23}(t)$ определяется из уравнения:

$$p r_{12}^{2\lambda} = \frac{2M_\infty \varepsilon_{\theta 12}(t)}{(\beta+1)(\beta+1+2\lambda)} \left(r_{12}^{\beta+1+2\lambda} - 1\right) -$$

$$- \frac{2M_\infty \varepsilon_{\theta 12}(t) + \sigma_{сж}(\beta+1)}{2\lambda(\beta+1)} \left(r_{12}^{2\lambda} - 1\right) + q - \frac{A(t)}{3}. \qquad (33)$$

Особый интерес представляют два крайних случая, позволяющие оценить положение границы $r_{12}(t)$: идеально-хрупкий породный массив и идеально-пластичный породный массив. Приведенное выше решение общей задачи при $M\infty\to\infty$, $r_{12}=r_{23}$ даёт предельный переход к решению для идеально-хрупких горных пород, а при $M\infty\to 0$, $\sigma_0=\sigma_{сж}$, $r_{23}=1$ – к решению для идеально-пластичных пород. Не приводя выражений для напряжений и смещений, запишем выражения для координаты границы раздела в идеально-хрупких породных массивах:

$$r_{12}(t) = \left\{ \frac{2\lambda\left[q - A(t)/3\right] + \sigma_\theta}{2\lambda p + \sigma_\theta} \right\}^{\frac{1}{2\lambda}}, \qquad (34)$$

в идеально-пластичных породных массивах:

$$r_{12}(t) = \left\{ \frac{2\lambda\left[q - A(t)/3\right] + \sigma_{сж\infty}}{2\lambda p + \sigma_{сж\infty}} \right\}^{\frac{1}{2\lambda}}. \qquad (35)$$

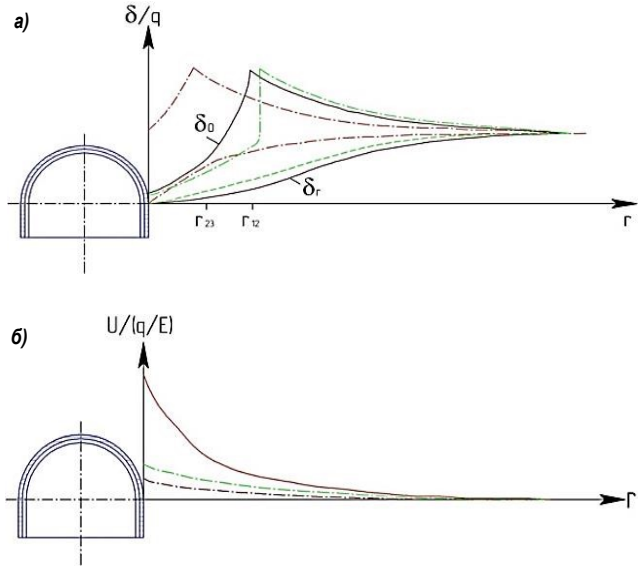


Рис. 2. Графики распределения напряжений (а) и смещений (б) вокруг выработки при запредельном деформировании породного массива, сложенного горными породами с различной склонностью к хрупкому разрушению

Перейдем к исследованию полученного решения. Прежде всего исследуем характер распределения напряжений и смещений в породном массиве, а также размеры областей разрушения при запредельном деформировании и разрушении горных пород в начальный момент времени *t=0*.

В качестве иллюстрации на *рис. 2* $u_ф$ сплошными линиями показано распределение напряжений (*рис. 2, а*) и радиальных смещений (*рис. 2, б*) вокруг выработки в случае образования трёх характерных областей механического состояния вмещающего породного массива. Для сравнения на том же рисунке при сопоставимых исходных данных показано распределение напряжений (*рис. 2, а*) и радиальных смещений (*рис. 2, б*) в идеально-хрупком породном массиве (пунктирные линии) и идеально-пластичном породном массиве (штрихпунктирные линии), когда вокруг выработки образуются только две области механического состояния массива с границами раздела r, определяемыми соответственно из уравнений (34) и (35).

Анализ графиков напряжений (*рис. 2, а*) показывает, что напряжения σ_0 имеют максимум на границе r_{12} раздела между областью допредельного деформирования и областями разрушения.

С увеличением склонности горных пород к хрупкому разрушению максимум напряжений σ_0 при прочих равных условиях остается на прежнем уровне, но смещается в глубь породного массива. В Распределении напряжений σ_r качественных изменений практически не происходит.

Радиальные смещения породного массива в сторону выработанного пространства (*рис. 2, б*) в идеально-хрупких горных породах больше, чем в идеально-пластичных, что объясняется большими размерами области разрушения в первом случае.

Но особенно возрастают радиальные смещения при учёте запредельного деформирования и дилатансии (β>1), чему соответствует сплошная линия на *рис. 2, б*.

В *табл. 1* приведены результаты сопоставления фактических безразмерных смещений контура выработки u_p с расчётными u_p, которые определены на основе предлагаемого решения, и с расчётными u_p вычисленными по рекомендациям ВНИМИ.

Для оценки устойчивости выработок особое значение имеют размеры областей запредельного деформирования и остаточной прочности, т. е. координаты границ раздела r_{12} и r_{23} [6-7].

На *рис. 3* представлены графики зависимости r_{12} (сплошные линии) и r_{23} (пунктирные линии) от уровня начальных напряжений $q/\sigma_{сж}$ для горных пород с различными значениями коэффициента поперечной деформации β.

График I соответствует геомеханической модели идеально-пластичного массива, остальные графики геомеханической модели с запредельным деформированием и образованием руинного разрушения при *p* = 0,1 *МПа*. Легко видеть, что до уровня начальных напряжений $q/\sigma_{сж}$, соответствующих образованию области руинного разрушения (перегибы на графиках r_{12}), количественные отличия от решения для геомеханической модели идеально-пластичного массива незначительны. При образовании области руинного разрушения происходят существенные качественные и, особенно, количественные изменения.

Исследования показывают [8-9], что рассмотренные выше две идеализированные геомеханические модели (идеально-хрупкий и идеально-пластичный породный массив) дают оценки, которые ограничивают соответственно сверху и снизу величину координаты r_{12}(1): в породном массиве с учётом его запредельного деформирования координата границы $r_{12}(t)$ меньше соответствующей координаты в идеально-хрупком массиве, но больше, чем в идеально-пластичном.

Чтобы оценить влияние реактивного сопротивления крепи *p* и величины остаточной прочности горных пород σ_0 на размеры

Таблица 1

Результаты сопоставления фактических безразмерных смещений контура выработки u_p с расчетными u_p, которые определены на основе предлагаемого решения, и с расчетными u_p вычисленными по рекомендациям ВНИМИ [8-9]

Шахта	Тип породы	Площадь поперечного сечения выработки в свету, S ($м^2$)	Глубина, H (м)	Способ выемки породы	$\sigma_{сж}$, МПа	$E*10^{-4}$, МПа
Шахта Зармитан Шахта Гужумсай ЮРУ, АО «НГМК»	граносиениты	11,2	709	БВР	20	0,7
	сиениты	19,1	696	БВР	25	1,0
	сланцы кварцево-слюдистые	8,5	1012	комбайновый	35	1,2
	сланцы углисто-глинистые, углистые	13,5	826	БВР	30	1,0
	породы из рудных зон	13	830	БВР	35	1,5

продолдение табл. 1

Шахта	Тип породы	Расчетное значение q, МПа	β	$\xi \frac{M}{E}$	Смещения контура		
					Измеренные, $u_ф$	Расчётные по предложенному решению, u_p	Расчётные по методу ВНИМИ, u_p
Шахта Зармитан Шахта Гужумсай ЮРУ, АО «НГМК»	граносиениты	18	8	2,5	20,0	15,0	14,0
	сиениты	18	8	2,5	6,0	8,0	9,0
	сланцы кварцево-слюдистые	25	9	2	14,0	7,5	8,0
	сланцы углисто-глинистые, углистые	22	9	2	23,0	18,0	9,0
	породы из рудных зон	22	6	4	4,0	3,0	5,5

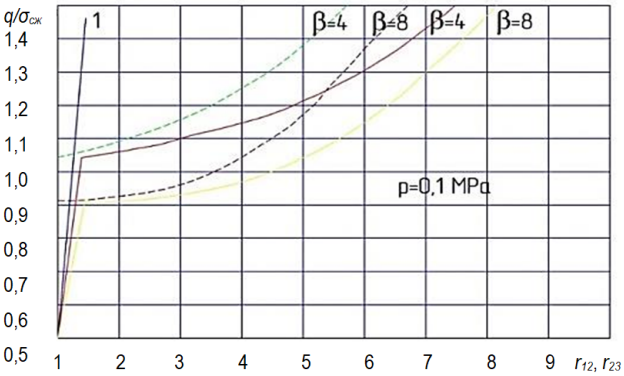


Рис. 3. Зависимости размеров областей разрушения вокруг выработки от уровня начального напряженного состояния массива

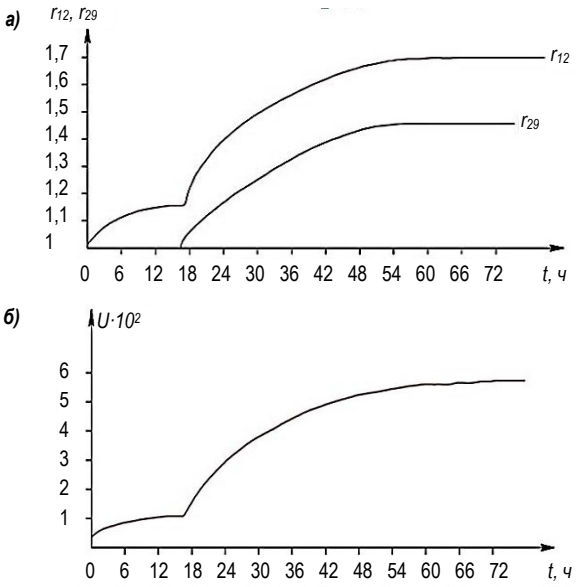


Рис. 3. Зависимости размеров областей разрушения вокруг выработки от уровня начального напряженного состояния массива

областей разрушения, обратимся к анализу уравнений (32) и (34). Размеры областей разрушения, и в частности r_{12}, увеличиваются с уменьшением p и σ_0 [10].

При σ_0 = 0 породы переходят в состояние руинного разрушения, и область приконтурного массива, заполненная такими породами, может существовать только при реактивном сопротивлении крепи $p > 0$. При отсутствии крепи ($p = 0$) породы в этой области теряют устойчивость: при $\sigma_0 = 0$ и $p = 0$, судя по уравнениям (32) и (34), $r_{12} \to \infty$.

Рассмотрим влияние фактора времени на размеры областей разрушения, что удобно сделать в результате численного анализа функций $r_{12}(t)$ и $r_{23}(t)$ на основании (32) и (22).

Построим графические зависимости $r_{12}(t)$ и $r_{23}(t)$ при следующих исходных данных [11]: p=0; q=3,3 *МПа*; $\sigma_{сж}$ = 6 *МПа*; $\sigma_{сж}$ = 3 *МПа*; σ_0 =0,5 *МПа*; E_0 = 800 *МПа*; M_0 = 1200 *МПа*; t_0= 105 *с*; p = 30°; β = 4,5.

Результаты построений, выполненные по уравнениям (32) и (22), показаны на *рис. 4, а*.

На *рис. 4, б* по формуле (30) построена соответствующая зависимость безразмерных радиальных смещений контура выработки.

Таким образом, установлены распределения напряжений и смещений вокруг выработки при запредельном деформировании породного массива, сложенного горными породами с различной склонностью к хрупкому разрушению.

Для оценки устойчивости выработок особое значение имеют размеры областей запредельного деформирования и остаточной прочности, т. е., координаты границ раздела от уровня начального напряженного состояния массива.

Исследования показывают, что рассмотренные идеализированные геомеханические модели (идеально-хрупкий и идеально-пластичный породный массив) дают оценки, которые ограничивают соответственно сверху и снизу величину координаты $r_{12}(1)$ в породном массиве с учётом его запредельного деформирования координата границы r_{12} (t) меньше соответствующей координаты в идеально-хрупком массиве, но больше, чем в идеально-пластичном.

Размеры областей разрушения и радиальные смещения со временем увеличиваются по нелинейному закону установленные в результате численного анализа принятых функций.

Библиографический список:

1. Фадеев Б.А. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 236 с.
2. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твёрдого тела. – М.: Мир, 1987. – 236 с.
3. Назаров З.С., Жиянов А.Б., Шарипов Л.О. Оценка главных горизонталных напряжений по сведениям о геодинамическом районировании близко расположенных месторождений-аналогов // Материалы международной конференции по комплексному инновационному развитию Зарафшанского региона: Достижения, проблемы и перспективы. Навои, Узбекистан, 27-28 октября 2022 г. – С. 174-178.
4. Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Филиппова А.А., Шклярский М.Ф. Изучения проявления горного давления на моделях. – М.: Углетехиздат, 1997. – 283 с.
5. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – С. 98-102.
6. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Sharipov L.O., Nazarov A.Z. Calculation of the pit wall mass by finite element method in the Midas GTS NX software // Science and Education in Karakalpakstan. Karakalpakstan, 2023. – No. 1/2(31), pp. 29-34.
7. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Sharipov L.O., Sunnatulloev Sh. Application of professor D. Lobshire's geomechanical classification for in-depth zoning of the board of the Amantaytau mine // E3S Web of Conferences. GEOTECH-2023. 417, 01001 (2023). Doi.org/10.1051/e3sconf/202341701001.
8. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах. – М.: Недра, 1986. – С 102-108.
9. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1992. – С. 104-110.
10. Покровский Г.И., Федоров И.С. Центробежное моделирование в горном деле. – М.: Недра, 1989. – 247 с.
11. Ямщиков В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. – М.: Недра, 1983. – 296 с.

«GORNIY VESTNIK UZBEKISTANA», 2025. No. 3 (102) pp. 4-9

THEORETICAL STUDY OF THE FEATURES OF GEOMECHANICAL PROCESSES OF EXTREME DEFORMATION IN THE VICINITY OF THE WORKING FACE

Nazarov Z.S., Associate Professor, Department of Mining, PhD in Technical Sciences.
Buriev Sh.U., Senior Lecturer, Department of Mining and Processing of Rare and Radioactive Metal Ores.
Jhiyanov A.B., Associate Professor, Department of Mining and Processing of Rare and Radioactive Metal Ores, PhD.

Navoi State Mining Institute. Navoi, Uzbekistan.

This article examines the features of extreme deformation of rock masses surrounding mine workings, primarily characterized by the formation of distinct zones of extreme deformation and residual strength of the rock. It has been established that the stress σ_0 reaches a maximum at the boundary r_{12} separating the zone of subcritical deformation from the zones of failure. With an increase in the brittleness tendency of the rock, the maximum stress σ_0 remains at the same level under equal conditions but shifts deeper into the rock mass. Closed failure zones are considered using a geomechanical model of a homogeneous isotropic mass with an initially equal-component stress state, consisting of solid rocks with rheological properties. An assessment is conducted, and the influence of the reactive support resistance p and the residual rock strength σ_0 on the size of failure zones is established. It is shown that the size of failure zones and radial displacements increase over time according to a nonlinear law.

Keywords: *deformation, mine working, strength, failure, stress, equilibrium, relaxation, rheological properties, brittleness, displacement, geomechanics, reactive resistance, support, working contour.*

Bibliographic list:

1. Fadeev B.A. Finite Element Method in Geomechanics. – Moscow: Nedra, 1987. – 236 p.
2. Crouch S., Starfield A. Boundary Element Methods in Solid Mechanics. – Moscow: Mir, 1987. – 236 p.
3. Nazarov Z.S., Zhiyanov A.B., Sharipov L.O. Estimation of Principal Horizontal Stresses Based on Geodynamic Zoning Data of Closely Located Analog Deposits // Proceedings of the International Conference on Integrated Innovative Development of the Zarafshan Region: Achievements, Problems and Prospects. Navoi, Uzbekistan, October 27-28, 2022, pp. 174-178.
4. Kuznetsov G.N., Budko M.N., Filippova A.A., Shklyarsky M.F. Studies of Mining Pressure Manifestations on Models. Moscow: Ugletekhizdat, 1997. 283 p.
5. Baklashov I.V. Deformation and Failure of Rock Masses. – Moscow: Nedra, 1988, pp. 98-102.
6. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Sharipov L.O., Nazarov A.Z. Calculation of the Pit Wall Mass by Finite Element Method in the Midas GTS NX Software // Science and Education in Karakalpakstan. Karakalpakstan, 2023. No. 1/2(31), pp. 29-34.
7. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Sharipov L.O., Sunnatulloev Sh. Application of Professor D. Lobshire's Geomechanical Classification for In-Depth Zoning of the Board of the Amantaytau Mine // E3S Web of Conferences. GEOTECH-2023. 417, 01001 (2023). Doi.org/10.1051/e3sconf/202341701001.
8. Baklashov I.V., Kartozia B.A. Mechanical Processes in Rock Masses. – Moscow: Nedra, 1986, pp. 102-108.
9. Baklashov I.V., Kartozia B.A. Mechanics of Underground Structures and Support Designs. – Moscow: Nedra, 1992, pp. 104-110.
10. Pokrovsky G.I., Fedorov I.S. Centrifugal Modeling in Mining. – Moscow: Nedra, 1989. – 247 p.
11. Yamshchikov V.S. Methods and Tools for Research and Monitoring of Rocks and Processes. – Moscow: Nedra, 1983. 296 p.

УДК 622.271.3 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.002

КОМПЛЕКСНЫЙ ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ




Заиров Ш.Ш.,
профессор кафедры
«Горное дело» АФ НИТУ «МИСИС»,
д.т.н.

Фатхиддинов А.У.,
заместитель декана
по учебной работе факультета
энергетики и машиностроения
Алмалыкского филиала ТГТУ, PhD

Эргашев Н.Х.,
заместитель начальника
ПТО рудника «Ауминзо-Амантой»
Северного РУ АО «НГМК», PhD

Сафарова М.Д.,
докторант кафедры
«Горное дело» НГГТУ

Ushbu maqolada ommaviy portlatishlarning massivning zo'riqish-deformatsiya holatiga ta'siri ko'rib chiqilgan va zaxira koeffitsienti bo'yicha barqarorlikni baholash uslubii tavsiflangan. Barqarorlikni yo'qotish xavfini kamaytirish uchun yuklamalarni qayta taqsimlash va yangi muvozanat holatini shakllantirishni ta'minlovchi temirbeton novdalar bilan massivni oldindan mustahkamlash texnologiyasi taklif etilgan. Mustahkamlovchi elementlar tomonidan yaratiladigan qo'shimcha qarshilikni hisobga olish imkonini beruvchi ankerni armaturalash bilan Mor-Kulonning modifikatsiyalangan mezoni formallashtirilgan. Mazkur texnologiyani joriy etganda qiyaliklarning barqarorlik koeffitsienti me'yoriy qiymatlarga yetkazilishi ta'minlanishi ko'rsatilgan, bu esa uning samaradorligi va chuqur konlar sharoitida qo'llanish istiqbolliligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: *ochiq kon ishlari, qiyaliklarning barqarorligi, barqarorlik zaxirasi koeffitsienti, chuqur konlar, burg'ilash-portlatish ishlari, seysmik ta'sir, Mor-Kulon mezoni, temirbeton novdalar, ankerni armaturalash, tog' jinslarining mustahkamlik xususiyatlari, modifikatsiyalangan mezon, yer osti boyliklaridan oqilona foydalanish.*

В работе рассматривается влияние массовых взрывов на напряжённо-деформированное состояние массива и описывается методика оценки устойчивости по коэффициенту запаса. Для снижения риска потери устойчивости предложена технология опережающего укрепления массива железобетонными штангами, обеспечивающая перераспределение нагрузок и формирование нового состояния равновесия. Приведена формализация модифицированного критерия Мора-Кулона с учётом анкерного армирования, позволяющего учитывать дополнительное сопротивление, создаваемое укрепляющими элементами. Показано, что внедрение данной технологии обеспечивает повышение коэффициента устойчивости откосов до нормативных значений, что подтверждает её эффективность и перспективность применения в условиях глубоких карьеров.

Ключевые слова: *открытые горные работы, устойчивость откосов, коэффициент запаса устойчивости, глубокие карьеры, буровзрывные работы, сейсмическое воздействие, критерий Мора-Кулона, железобетонные штанги, анкерное армирование, прочностные характеристики пород, модифицированный критерий, рациональное использование недр.*

Современное состояние горнодобывающей промышленности характеризуется переходом к разработке глубоко залегающих рудных тел, что сопровождается резким усложнением горно-геологических, гидрогеологических и техногенных условий [1]. В этих условиях особую значимость приобретает научное обоснование возможности увеличения углов откосов бортов карьеров как способа снижения объёмов вскрышных работ, сокращения площади отвальных территорий и повышения коэффициента извлечения полезного компонента.

При реализации массовых взрывов в горных массивах возникают сложные физико-механические процессы, сопровождающиеся генерацией сейсмических упругих волн [2]. Их характер определяется мощностью заряда, расстоянием до эпицентра и физико-механическими свойствами пород.

Вблизи заряда формируются зоны сжатия, остаточных и упругих деформаций, что обуславливает образование объёмных и поверхностных волн.

Наибольшую сейсмическую опасность представляет главная фаза колебаний, характеризующаяся большой амплитудой и продолжительностью. Такие колебания способны вызывать перераспределение напряжений в массиве и снижать устойчивость откосов, что требует специальной оценки. Для этой цели используется коэффициент запаса устойчивости $K_{уст}$, определяемый как отношение сил, удерживающих массив от сдвига, к силам, способствующим его смещению [3]:

$$K_{уст} = \frac{\sum R}{\sum T}, \quad (1)$$

где ∑R – сумма удерживающих сил (сцепление, силы трения, вес устойчивой части массива);

∑T – сумма сдвигающих сил (вес призмы обрушения, гидростатическое давление, сейсмическая нагрузка).

Для количественной оценки устойчивости откосов в условиях сейсмического воздействия необходимо использовать прочностные критерии, описывающие соотношение между действующими напряжениями и параметрами прочности горных пород.

Наиболее распространённым и обоснованным является критерий Мора-Кулона, согласно которому условие предельного равновесия откоса выражается как [3]:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\varphi, \quad (2)$$

где τ – касательное напряжение, *Па*;

σ – нормальное напряжение, *Па*;

c – удельное сцепление, *Па*;

φ – угол внутреннего трения породы, *град*.

Для обеспечения устойчивости принимают условие [3]:

$$K_{уст} \geq 1{,}3 \div 1{,}4$$

в зависимости от глубины и горно-геологических условий.

Качество дробления горной массы и воздействие на откосы во многом определяются параметрами зарядов. Основное уравнение расчёта радиуса зоны разрушения при взрыве [4]:

$$R = k \cdot \left(\frac{Q}{\gamma}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

где R – радиус зоны разрушения, *м*;

Q – масса заряда ВВ в скважине, *кг*;

γ – плотность ВВ, *кг/м³*;

k – коэффициент, учитывающий свойства массива.

Для снижения сейсмического эффекта применяется правило эквивалентного заряда [5, 6]:

$$V = k_s \cdot \left(\frac{Q^{\frac{1}{2}}}{R}\right)^{\alpha}, \quad (4)$$

где V – скорость колебаний частиц, *мм/с*;

Q – масса заряда ВВ, *кг*;

R – расстояние до точки наблюдения, *м*;

α, k_s – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств массива.

Экономический эффект от увеличения углов откосов оценивается через граничный коэффициент вскрыши ($k_{гр}$) [7]:

$$k_{гр} = \frac{C_p - C_o}{C_в}, \quad (5)$$

где C_p – стоимость реализации товарной продукции, *сум*;

C_o – затраты на добычу и переработку руды, *сум*;

$C_в$ – затраты на вскрышные работы, *сум*.

При $k_{факт} \leq k_{гр}$ разработка месторождения считается экономически целесообразной.

В условиях глубоких карьеров обеспечение устойчивости откосов приобретает первостепенное значение, поскольку даже незначительное снижение коэффициента запаса устойчивости (на 0,1-0,2) способно инициировать развитие локальных либо крупномасштабных деформационных процессов, приводящих к частичной или полной потере устойчивости борта. В этих условиях требуется применение превентивных инженерных решений, направленных на стабилизацию массива до его обнажения [8]. Одним из наиболее перспективных и технологически обоснованных методов является опережающее укрепление массива при помощи железобетонных штанг (анкерных элементов). Предлагаемая технология обеспечивает не только упрочнение приповерхностной зоны массива, но и формирование нового распределения напряжений за счёт передачи части нагрузки от призмы обрушения на армирующие элементы. В результате достигается комплексное воздействие на напряжённо-деформированное состояние массива, что существенно снижает вероятность развития трещиноватости и повышает устойчивость откосов. Кроме того, использование железобетонных штанг позволяет формировать сдвоенные и строенные уступы без предохранительных берм, что обеспечивает более рациональное использование недр и способствует повышению экономической эффективности разработки в условиях углубления карьеров. Экспериментальные и расчётные исследования [8-11] показали, что применение данного метода обеспечивает возможность увеличения углов откосов до 55-60° при сохранении коэффициента устойчивости не ниже 1,3-1,4, что соответствует нормативным требованиям.

Таким образом, железобетонные штанги рассматриваются как эффективное инженерное решение для стабилизации склонов в сложных горно-геологических условиях и научного обоснования безопасного увеличения углов откосов бортов глубоких карьеров.

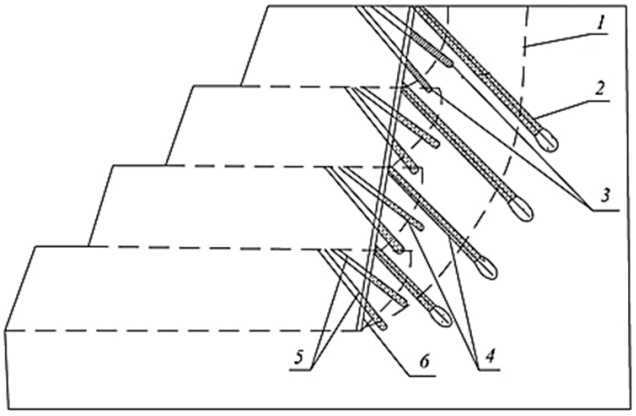


Рис. 1. Рекомендуемая технология укрепления откоса борта карьера с помощью железобетонных штанг

Рекомендуется технология опережающего укрепления массива при помощи железобетонных штанг, предусматривающая армирование массива до его вскрытия, в неразгруженном состоянии (*рис. 1*).

Этапы технологии включают:

1. Подготовку рабочей площадки на противоположной стороне откоса вдоль проектируемого контура.

2. Бурение наклонных скважин вдоль направления предполагаемых удерживающих усилий. Длина скважин должна превышать расчётные параметры отрезков призмы обрушения. Сначала выполняется бурение основных скважин большого диаметра для установки железобетонных штанг.

3. Дополнительное бурение наклонных скважин малого диаметра, используемых для размещения вспомогательных элементов армирования.

4. Установку рельсов (поз. 2), выполняющих функцию жёстких армирующих вставок, и железобетонных штанг (поз. 3) с торца скважин в направлении массива.

5. Бетонирование установленных элементов крепи (поз. 4) внутри скважин до уровня проектного откоса.

6. Сохранение небетонированной части скважины (поз. 5) от поверхности откоса до рабочей площадки, которая впоследствии используется для размещения зарядов при контурном взрывании. Это решение снижает воздействие взрывной энергии на армированную часть массива.

7. Формирование поверхности откоса методом щелевого (контурного) взрывания (поз. 6).

Обнажение укреплённого массива осуществляется поэтапно, в процессе углубления карьера. Сначала разрабатывается верхний уступ до укреплённого предельного положения, после чего с образовавшейся площадки выполняется следующий цикл укрепления на нижнем горизонте. В результате армирования вес призмы потенциального обрушения (поз. 1) передаётся на железобетонные штанги, работающие на срез и изгиб. Совместная работа породы, бетона и арматурных элементов обеспечивает перераспределение напряжений и ограничивает развитие трещиноватости, что приводит к значительному повышению коэффициента устойчивости откосов.

Применение железобетонных штанг в качестве элементов опережающего армирования позволяет создавать в массиве своеобразный каркас, который работает совместно с породой. При этом принципиальное отличие метода заключается в том, что крепление производится до обнажения массива, в его естественном напряжённом состоянии. Такой подход обеспечивает минимизацию разгрузки массива и предупреждение преждевременного раскрытия трещин, перераспределение напряжений по площади армированного блока, а также создание условий для формирования более крутых и высоких

уступов без риска потери устойчивости. Железобетонные штанги работают в комплексе с рельсовыми вставками и вспомогательными анкерами. Рельсы выполняют роль жёстких армирующих элементов, воспринимающих изгибающие усилия, тогда как штанги берут на себя срезающие и растягивающие нагрузки.

В результате создаётся пространственная система удерживающих сил, препятствующих смещению призмы обрушения.

При проектировании системы опережающего укрепления необходимо учитывать:

1. Длину штанг L, которая должна превышать протяжённость потенциальной призмы обрушения на величину запаса :

$$L = L_{пр} + \Delta, \quad (6)$$

где L – проектная длина штанги (или анкера), которая должна быть заложена в массив, *м*;

$L_{пр}$ – длина предполагаемой призмы обрушения (т.е. той части массива, которая может быть сдвинута или обрушена при отсутствии укрепления); определяется из геомеханических расчётов устойчивости откоса, *м*;

Δ – запас длины (дополнительный отрезок за пределами призмы обрушения), обеспечивающий анкерование в устойчивой породе (обычно принимается 1,0-2,0 *м* или 10-20 *%* от длины призмы, в зависимости от свойств пород и глубины разработки.

Штанга должна быть длиннее потенциальной призмы обрушения, чтобы её конец опирался на устойчивый массив. Именно поэтому берут расчётную длину призмы $L_{пр}$ и прибавляют запас Δ.

2. Диаметр скважин (d). Для железобетонных штанг принимается d = 120-200 *мм*, для рельсовых вставок и вспомогательных анкеров 50-80 *мм*.

3. Расстояние между скважинами (a). Задаётся исходя из размеров блоков нарушенной зоны и обычно составляет 1,5-2,5 *м*.

4. Прочностные характеристики бетона и арматуры. Используются тяжёлые бетоны классов не ниже B25, а также арматурные стержни класса A–III и выше.

При моделировании распределения напряжений установлено, что внедрение армирующих элементов позволяет увеличить коэффициент устойчивости откосов ($K_{уст}$) на 20-40 *%* по сравнению с традиционными схемами формирования уступов.

Практическое применение метода может быть рассмотрено на условном примере отработки высоких уступов высотой 25-30 *м*.

1. На противоположной стороне проектируемого откоса создаётся временная площадка шириной 4-6 *м*, позволяющая разместить буровую установку и подать бетон.

2. Производится бурение скважин под углом 10-15° к горизонту. Основные скважины закладываются в шахматном порядке, что обеспечивает равномерное армирование массива.

3. В скважины устанавливаются железобетонные штанги длиной 10-15 *м* с рельсовыми вставками.

4. Пространство вокруг элементов заливается цементно-песчаным раствором или тяжёлым бетоном, обеспечивающим монолитность системы.

5. После набора прочности бетона производится контурное взрывание по линии проектного откоса.

В результате массив вскрывается уже в укреплённом состоянии, что значительно снижает вероятность сдвига пород.

Внедрение данной технологии в практику открытых горных работ обеспечивает ряд существенных преимуществ:

– повышение коэффициента устойчивости откосов (за счёт восприятия части нагрузки армирующими элементами коэффициент устойчивости увеличивается до значений $K_{уст}$ = 1,3-1,6, что соответствует требованиям безопасности при глубокой отработке);

– сокращение объёмов вскрышных работ (возможность формирования более крутых углов откосов (60-75°) снижает объёмы перемещения вмещающих пород на 8-12 *%*);

– уменьшение площади отвальных территорий (сокращение вскрышных объёмов приводит к более компактному размещению отвалов, что имеет важное экологическое значение);

– стабилизация напряжённого состояния массива (армирование ограничивает развитие трещин, предотвращает прорывы подземных вод и уменьшает вероятность горных ударов.

Рекомендованный метод целесообразно внедрять при разработке месторождений с глубоко залегающими рудными телами, сложными геомеханическими условиями (трещиноватые, обводнённые массивы, склонные к оползневым процессам) и необходимостью максимального сохранения полезных ископаемых при минимизации вскрышных объёмов.

В перспективе возможно комбинирование технологии опережающего армирования с методами инъекционного закрепления массива (силикатизация, цементация), а также с использованием композитных материалов (стеклопластиковые анкеры), что позволит ещё более повысить долговечность и эффективность укрепляющих конструкций.

Таким образом, технология опережающего укрепления массива железобетонными штангами является перспективным направлением в области обеспечения устойчивости откосов глубоких карьеров. Она позволяет создавать устойчивые уступы большой высоты без предохранительных берм, что существенно повышает эффективность использования недр и безопасность горных работ. Внедрение метода может рассматриваться как одно из ключевых решений для карьеров, переходящих в стадию глубокой отработки, где традиционные схемы крепления уже не обеспечивают требуемого уровня надёжности.

Эффективность метода опережающего укрепления массива с использованием железобетонных штанг оценивается как повышение коэффициента устойчивости [12]:

$$\Delta K_{уст} = \frac{K_{уст}^{арм}}{K_{уст}^{без}}, \quad (7)$$

где $K_{уст}^{арм}$ – коэффициент устойчивости откоса с армированием;

$K_{уст}^{без}$ – коэффициент устойчивости без армирования.

По данным экспериментальных исследований [8-11], внедрение железобетонных штанг позволяет увеличить угол откоса до β = 55-60° при сохранении нормативного коэффициента устойчивости.

Классическая теория прочности горных пород при сдвиге основывается на критерии Мора-Кулона согласно формуле (2).

В условиях глубоких карьеров, характеризующихся высокой степенью трещиноватости и наличием зон пониженной прочности, использование только природных параметров массива (c и φ) часто оказывается недостаточным для обеспечения требуемого коэффициента запаса устойчивости.

Для повышения устойчивости откосов применяется опережающее армирование массива железобетонными штангами (анкерами). Их воздействие выражается в формировании дополнительного упрочняющего эффекта, который может быть представлен в виде эквивалентного увеличения прочностных параметров массива.

Таким образом, модифицированный критерий Мора-Кулона с учётом анкеров записывается как [3]:

$$\tau^*_{res} = c + \sigma'_n \cdot \tan\varphi + q_a, \quad (8)$$

где τ^*_{res} – результирующее сопротивление сдвигу с учётом анкеров, *Па*;

$\sigma'_n = \sigma_n - u$ – эффективное нормальное напряжение (с поправкой на поровое давление u), *Па*;

q_a – эквивалентное дополнительное сопротивление, создаваемое анкерами, *Па*.

Величина q_a определяется через суммарную силу анкеров, работающих на сдвиг, приведённую к единице длины поверхности возможного скольжения:

$$q_a = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_{a,i} \cdot \cos\psi_i}{L}, \quad (9)$$

где $F_{a,i}$ – рабочее усилие *i*-го анкера, *Н*;

ψ_i – угол между осью анкера и направлением сдвига, *град*;

L – длина потенциальной поверхности скольжения, *м*;

n – число анкеров, закреплённых в данной зоне.

Коэффициент запаса устойчивости откоса в присутствии анкерного армирования вычисляется по формуле [13]:

$$FS = \frac{c + \sigma_n' \tan\varphi + q_a}{\tau_{driving}}, \quad (10)$$

где $\tau_{driving}$ – касательное напряжение, вызываемое действием собственного веса пород и внешних нагрузок, *Па*.

Таким образом, включение в расчёт дополнительного параметра q_a позволяет формализовать влияние анкерного армирования на устойчивость откосов.

В практических инженерных расчётах данный подход обеспечивает возможность количественной оценки эффективности систем укрепления и выбора оптимального числа, длины и расположения анкеров в массиве.

Библиографический список:

1. Аллилуев В.Н. Геотехнология освоения глубоко залегающих месторождений богатых железных руд КМА Монография. – М.: «Горная книга», 2008. – 256 с.
2. Кузнецов В.М. Сейсмическое действие взрывов в горных породах. – М.: «Недра», 1973. – 264 с.
3. Шахунянц Г.М. Механика горных пород и массивов. – М.: «Недра», 1988. – 432 с.
4. Шевяков Г.В. Взрывное дело в горной промышленности. – М.: «Недра», 1990. – 352 с.
5. Кузнецов В.М., Шеин В.С. Взрывное разрушение горных пород. – М.: «Недра», 1975. – 296 с.
6. Hoek E., & Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980. – 527 p.
7. Трубецкой К.Н., Арсентьев А.И., Назаров Ю.В. Экономика и организация горного производства. – М.: «Недра», 1998. – 367 с.
8. Ларичев А.И., Трофименков Ю.Г. Устойчивость откосов и бортов карьеров. – М.: «Недра», 1982. – 256 с.
9. Кузнецов В.М. Анкерное крепление горных выработок. – М.: «Недра», 1977. – 231 с.
10. Hoek E., Bray J.W. Rock Slope Engineering. – 3rd ed. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. – 358 p.
11. Литвинский Г.Г. Открытые горные работы: устойчивость откосов и проектирование. – М.: «Горная книга», 2010. – 368 с.
12. Ларичев А.И., Трофименков Ю.Г. Устойчивость откосов и бортов карьеров. – М.: «Недра», 1982. – 256 с.
13. Stillborg B. Professional Users Handbook for Rock Bolting. – Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1994. – 129 p.

«GORNIY VESTNIK UZBEKISTANA», 2025. No. 3 (102) pp. 10-13

COMPREHENSIVE GEOTECHNICAL APPROACH TO IMPROVING THE STABILITY OF DEEP PIT SLOPES

[1]***Zairov Sh.Sh.,*** *Professor of the «Mining Engineering» Department, Doctor of Technical Sciences.*
[2]***Fathiddinov A.U.,*** *Deputy Dean for Academic Affairs of the Faculty of Energy and Mechanical Engineering, PhD.*
[3]***Ergashev N.Kh.,*** *Deputy Head of the Production and Technical Department, «Auminzo-Amantoy» Mine, Northern Mining Administration, PhD.*
[4]***Safarova M.D.,*** *Doctoral Student, Department of «Mining Engineering».*

[1]***Almalyk Branch of NUST «MISIS». Almalyk, Uzbekistan.***
[2]***Almalyk Branch of Tashkent State Technical University. Almalyk, Uzbekistan.***
[3]***Navoi Mining and Metallurgical Combinat JSC (NMMC). Uchkuduk, Uzbekistan.***
[4]***Navoi State Mining and Technological University.***

This study examines the impact of mass blasting on the stress-strain state of the rock mass and presents a methodology for assessing slope stability using the safety factor. To reduce the risk of slope failure, a technology for advanced reinforcement of the rock mass using reinforced concrete rods is proposed, ensuring load redistribution and the formation of a new equilibrium state. A formalization of the modified Mohr-Coulomb criterion is presented, taking into account anchor reinforcement, which allows for the consideration of additional resistance provided by strengthening elements. It is demonstrated that the implementation of this technology increases the slope stability factor to regulatory values, confirming its effectiveness and practical potential in deep pit conditions.

Keywords: *Open-pit mining, slope stability, safety factor, deep pits, drilling and blasting, seismic impact, Mohr-Coulomb criterion, reinforced concrete rods, rock bolting, rock strength properties, modified criterion, rational use of mineral resources.*

Bibliographic list:

1. Alliluev V.N. Geotechnology for the Development of Deep-Seated Rich Iron Ore Deposits of the Kursk Magnetic Anomaly. Monograph. – Moscow: «Gornaya Kniga», 2008. – 256 p.
2. Kuznetsov V.M. Seismic Effects of Blasting in Rock Masses. – Moscow: «Nedra», 1973. – 264 p.
3. Shakhunyants G.M. Mechanics of Rocks and Rock Masses. – Moscow: «Nedra», 1988. – 432 p.
4. Shevyakov G.V. Blasting Operations in the Mining Industry. – Moscow: «Nedra», 1990. – 352 p.
5. Kuznetsov V.M., Shein V.S. Blasting Destruction of Rocks. – Moscow: «Nedra», 1975. – 296 p.
6. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980. – 527 p.
7. Trubetskoy K.N., Arsentyev A.I., Nazarov Yu.V. Economics and Organization of Mining Production. – Moscow: «Nedra», 1998. – 367 p.
8. Larichev A.I., Trofymenkov Yu.G. Stability of Pit Slopes and Walls. – Moscow: «Nedra», 1982. – 256 p.
9. Kuznetsov V.M. Rock Bolt Support of Mine Workings. – Moscow: «Nedra», 1977. – 231 p.
10. Hoek E., Bray J.W. Rock Slope Engineering. – 3rd ed. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. – 358 p.
11. Litvinsky G.G. Open-Pit Mining: Slope Stability and Design. – Moscow: «Gornaya Kniga», 2010. – 368 p.
12. Larichev A.I., Trofymenkov Yu.G. Stability of Pit Slopes and Walls. – Moscow: «Nedra», 1982. – 256 p.
13. Stillborg B. Professional Users Handbook for Rock Bolting. – Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1994. – 129 p.

УДК 622.271.326 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.003

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК



Назаров З.С.,
доцент кафедры
«Горное дело» НГГТУ, к.т.н.

Жиянов А.Б.,
доцент кафедры
«Добыча и переработка руд редких и радиоактивных металлов»
НГГТУ, PhD

Буриев Ш.У.,
старший предподаватель кафедры
«Добыча и переработка руд редких и радиоактивных металлов»
НГГТУ

Maqolada ellipsoidsimon ko'ndalang kesimga ega bo'lgan gorizontal kapital qazilma bilan svodsimon (gumbazsimon) ko'ndalang kesimga ega bo'lgan cho'zilgan lahimning tutashgan sohalari atrofida yuzaga keladigan geomexanik jarayonlarning xususiyatlari tadqiq etilgan. Geomexanik jarayonlar tahlili chegaraviy elementlar usuli (ChEU – МГЭ) asosida sonli uslubda bajarilgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, yemirilish zonalari asosan burchak nuqtalari yaqinida va ayniqsa lahimning shift qismida mahalliylashgan bo'ladi. Mo'rt yemirilish odatda yoriqlarning paydo bo'lishi bilan bog'liq bo'lib, bu holat plastiklik fazasida – ya'ni elastik bo'lmagan deformatsiyalar eng yuqori darajaga yetganda yuzaga chiqadi.

Kalit so'zlar: *geomexanika, deformatsiya, yoriq, kon lahimi, kon bosimi, tutashuv, siljish, oktaedrik tekislik, kuchlanish, tog' jinslari, tog' jinsi massivi.*

В статье рассмотрены особенности геомеханических процессов в окрестности сопряжения горизонтальной капитальной горной выработки эллипсоидного поперечного сечения с протяжённой выработкой, имеющей сводчатое поперечное сечение. Анализ геомеханических процессов выполнен численным методом МГЭ. Установлено что зоны разрушения локализованы вблизи угловых точек и в большей степени в кровле выработки, хрупкое разрушение как правило, связанное с трещинообразованием и возникает на фоне пластического разрушения, когда, очевидно неупругие деформации достигнуты предельного уровня.

Ключевые слова: *геомеханика, деформация, трещина, выработка, горное давление, сопряжение, сдвиг, октаэдрическая плоскость, напряжение, порода, горный массив.*

Разделение геомеханических процессов в массивах на процессы деформирования и разрушения является условным. Процесс разрушения в горных породах начинается на допредельной стадии и в полной мере проявляется на запредельной стадии деформирования, практически определяя уровень наблюдаемых деформаций. С другой стороны, с ростом деформаций за пределом прочности несущая способность горных пород уменьшается. Таким образом, процессы деформирования и разрушения органически связаны между собой они взаимно проникают и количественно определяют друг друга [1-3].

Вместе с тем наблюдается качественное различие геомеханических процессов на допредельных и запредельных стадиях. На допредельной стадии определяющими являются процессы деформирования с ростом деформаций напряжения увеличиваются до предельного уровня, при разгрузке большая часть деформаций восстанавливается и разрыхление пород становится незначительным. На запредельной стадии определяющими являются процессы разрушения, с ростом деформаций напряжения уменьшаются до некоторого минимального уровня, при разгрузке большая часть деформаций не восстанавливается и разрыхление пород достигает значительных размеров,

Необходимо отметить, что изучение допредельного деформирования породных массивов, когда процессы разрушения еще не проявляются, более доступно для исследователей и в этом смысле позволяет оценить влияние большинства факторов, определяющих механическое состояние породных массивов на допредельной, а затем и на запредельной стадии деформирования. Методы изучения запредельного деформирования и разрушения представляются более сложными и менее разработанными на сегодняшний день. Таким образом, анализ факторов, влияющих на допредельное деформирование, позволяет в определённой степени прогнозировать закономерности запредельного деформирования и проявления горного давления.

Отсюда возникает основная задача по изучению допредельного деформирования, это качественный и количественный анализ его закономерностей от воздействия различных факторов [4]. К таким определяющим факторам следует отнести:

– структурно-механические особенности породного массива (физическая и геометрическая анизотропия, искусственная неоднородность, начальное напряженное состояние);

– тип выработки (протяженная, камерная), форма её поперечного сечения, влияние забоя выработки;

– закономерности поведения горных пород под нагрузкой (нелинейность деформирования, реологические процессы и т. д.).

Исследуем напряженно-деформированное состояние в результате допредельного деформирования породных массивов

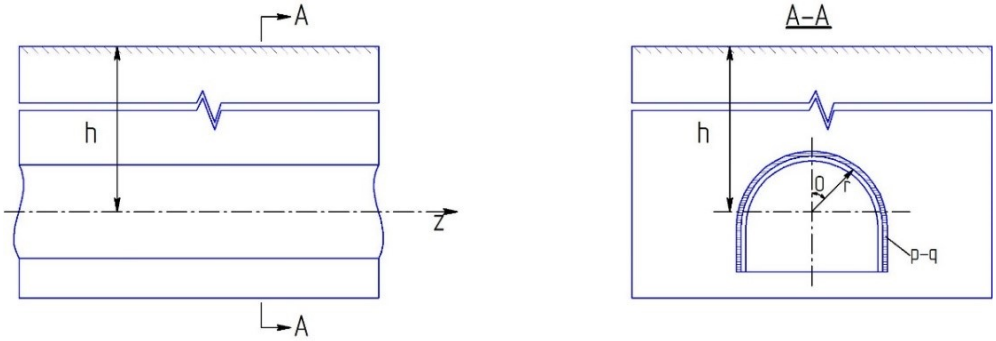


Рис. 1. Расчётная схема породного массива вокруг горизонтальной выработки при определении дополнительных напряжений

вокруг горных выработок с учётом перечисленных факторов, что можно выполнить аналитическими методами, без привлечения численных методов. Исследования начнём с решения простейшей задачи, когда породный массив может быть представлен однородной изотропной линейно-деформируемой геомеханической моделью, начальное напряженное состояние равнокомпонентное, а выработка имеет круговое поперечное сечение и рассматривается как протяженная, заглубленная. Решение такой задачи примем за базовое и в сравнении с ним будем производить оценку влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние породного массива.

При исследовании геомеханических процессов в окрестности горизонтальных заглубленных протяженных выработок кругового поперечного сечения, сооружаемых в однородном изотропном «несжимаемом» (коэффициент Пуассона равен 0,5) массиве с равнокомпонентным начальным напряженным состоянием, можно воспользоваться решением осесимметричной задачи теории упругости [5].

Если ось цилиндрической системы координат совместить с продольной осью выработки, сечения породного массива, нормальные к оси, будут находиться в состоянии плоской деформации. Иными словами, в этом случае можно рассматривать задачу в постановке плоской деформации с осевой симметрией.

Начальное напряженное состояние массива характеризуется компонентами:

$$\sigma_z = \sigma_r = \sigma_{\theta=} q\,,\ \tau_{rz} = \tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = 0 \qquad (1)$$

где q – учитывает влияние гравитационных сил и остальных факторов.

Соответствующая расчётная схема для определения дополнительных напряжений в массиве представлена на *рис. 1*.

При этом граничные условия имеют вид:

$$\sigma_r = p - q\,, \quad r = 1 \ \text{(на контуре выработки)},$$

$$\sigma_r = \sigma_\theta \to 0 \text{ при } r = \infty \qquad (2)$$

где p – реактивное сопротивление крепи.

Компоненты дополнительных напряжений, полученные из решения задачи, имеют вид:

$$\sigma_r = \frac{p-q}{r^2},\ \sigma_\theta = \frac{p-q}{r^2},\ \sigma_z = \frac{p-q}{r^2},$$

$$\sigma_z = 0,\ \tau_{rz} = \tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = 0. \qquad (3)$$

Полные напряжения в породном массиве находим в результате суммирования начальных (1) и дополнительных напряжений (3):

$$\sigma_r = q + \frac{p-q}{r^2},\ \sigma_\theta = q - \frac{p-q}{r^2},\quad \sigma_z = q,\ \tau_{rz} = \tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = 0. \qquad (4)$$

Компоненты деформаций, которые по происхождению являются дополнительными, определим, используя дополнительные напряжения (3):

Таблица 1

Значение σ_r, σ_θ, σ_z при p=0

r	**Напряжение в единицах, *q***		
	σ_r	σ_θ	σ_z
1	0	2,00	1,00
2	0,75	1,25	1,00
3	0,94	1,06	1,00
6	0,97	1,03	1,00
10	0,99	1,01	1,00

$$\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r = \frac{3}{2E}\frac{q-p}{r^2}. \qquad (5)$$

Соответствующие радиальные безразмерные смещения:

$$u = r\varepsilon_\theta = \frac{3}{2E}\frac{q-p}{r}. \qquad (6)$$

Анализ закономерностей распределения полных напряжений σ_r и σ_θ вокруг выработки показывает, что на её контуре (при r = 1) тангенциальное напряжение σ_θ имеет максимальное значение, а радиальное σ_r – минимальное. По мере удаления от контура выработки напряжения стремятся к начальным напряжениям в ненарушенном массиве. В *табл. 1* приведены значения σ_r, σ_θ, σ_z при p=0 (незакреплённая выработка). Хорошо видно, что в этом случае коэффициент концентрации напряжений на контуре круговой выработки равен двум и не зависит от местоположения рассматриваемой точки контура. Смещения также имеют максимальные значения на контуре выработки и быстро затухают по мере удаления в глубь массива.

Если начальное напряженное состояние массива отличается от равнокомпонентного, условия симметрии нарушаются. Рассмотрим начальное напряженное состояние массива с равными горизонтальными компонента M и напряжений, которое в прямоугольной системе координат имеет вид:

$$\sigma_y = q, \sigma_z = \sigma_x = \lambda q, \quad \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \qquad (7)$$

где λ – коэффициент бокового распора.

В качестве иллюстрации особенностей геомеханических процессов в окрестности сопряжения выработок рассмотрим сопряжение горизонтальной капитальной горной выработки эллипсоидного поперечного сечения с протяжённой выработкой, имеющей сводчатое поперечное сечение. Расчетный фрагмент этой задачи в виде половины сопряжения с указанием характерных геометрических размеров показан на *рис. 2*.

Анализ геомеханических процессов выполнен численным методом МГЭ [6-7]. Задача решалась в полных напряжениях с граничными условиями: на внешних границах модели $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = - \gamma H$ (где γ – удельный вес перекрывающих горных пород, H – глубина

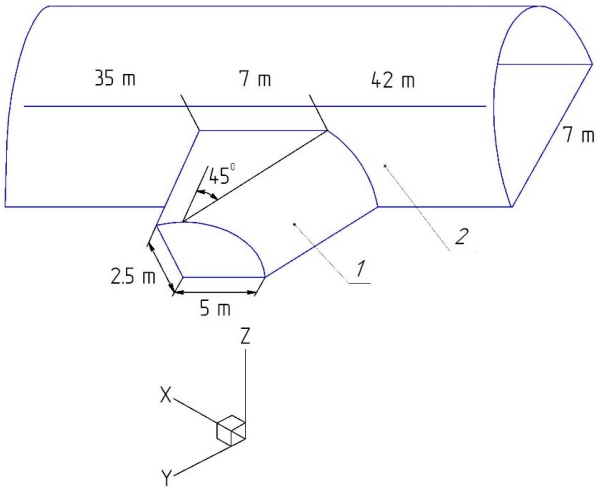


Рис. 2. Расчетный фрагмент решения задачи: *1 и 2 – поверхность соответственно сопряжения и примыкающего к сопряжению участка капитальной горизонтальной выработки*

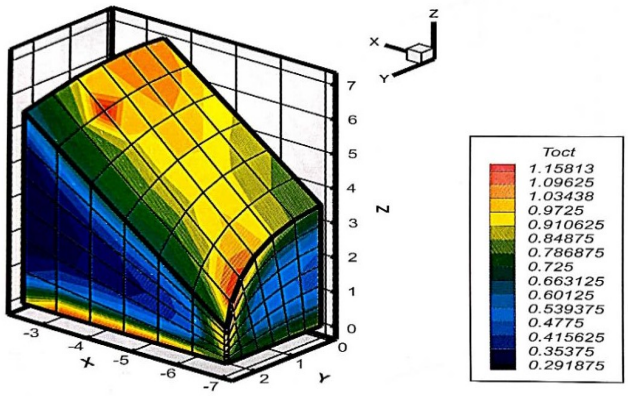


Рис. 3. Распределение октаэдрических касательных напряжений (в единицах γH) по поверхности сопряжений

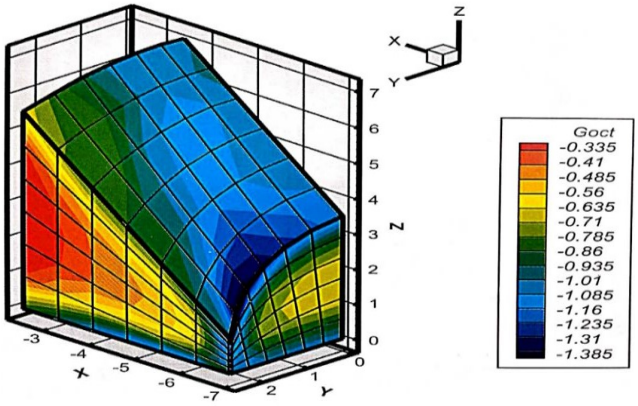


Рис. 4. Распределение октаэдрических нормальных напряжений (в единицах γH) по поверхности сопряжений

заложения капитальной горизонтальной выработки от поверхности, что соответствует равнокомпонентному гидростатическому полю начальных напряжений, на внутренней поверхности сопряжения нормальное реактивное сопротивление крепи $p = -0{,}1\,\gamma H$.

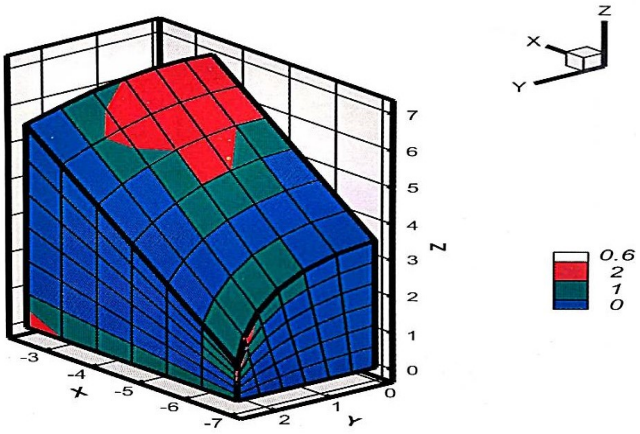


Рис. 5. Зоны разрушения на поверхности сопряжений (0 – нет; 1 – пластического; 2 – хрупкого) при $\gamma H/\sigma_{сж}$ = 0,6

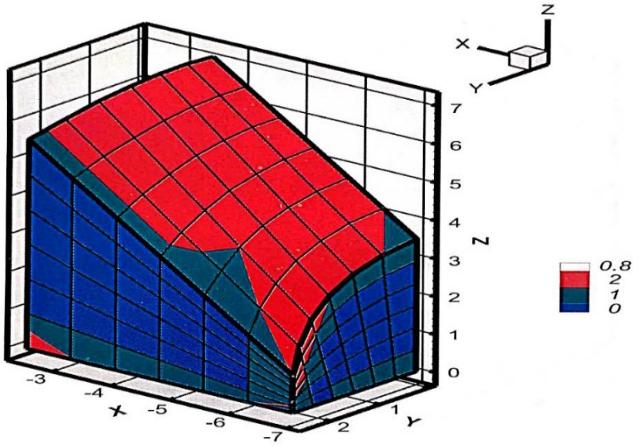


Рис. 6. Зоны разрушения на поверхности сопряжений (0 – нет; 1 – пластического; 2 – хрупкого) при при $\gamma H/\sigma_{сж}$= 0,8

В результате решения задачи для геомеханической модели линейного деформирования были определены компоненты главных напряжений σ_1, σ_2, σ_3. Они определяются по октаэдрическими площадками, выделенным в дефрмируемой среде. Эти площадки равноклонны к главным осям, отсекает на осях координат равные отрезки и имеют равные направляющие косинусы $l = m = n$ = 3-0,5.

Всего таких площадок 8, и вместе они образуют октаэдр. Площадки попарно параллельны, поэтому независимых площадок четыре. Эти площадки характеризуются октаэдрическими напряжениями и октаэдрическими деформациями.

Где октаэдрические касательные напряжения, или напряжения сдвига на октаэдрической плоскости, это напряжения, возникающие при деформации сдвига в деформируемой среде. Они действуют на октаэдрическую плоскость, которая равнонаклонена к главным осям напряжений. Эти напряжения характеризуют интенсивность сдвиговой деформации и определяются по формуле:

$$\tau_{окт} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)+(\sigma_3-\sigma_1)^2}, \qquad (8)$$

октаэдрические нормальные напряжения в единицах γH

$$\sigma_{окт} = \frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3) \qquad (9)$$

На *рис. 3* представлено распределение $\tau_{окт}$, а на *рис. 4* распределение $\sigma_{окт}$ по поверхности сопряжения в пределах выработки околоствольного двора.

Для оценки размеров областей разрушения был использован метод упругого наложения и огибающая предельных кругов в координатах $\tau_{окт}$ – $\sigma_{окт}$, построенная для предельного условия предложенного М.М. Филоненко-Бородич [8-9]:

$$\tau_{окт} = f(\sigma_{окт}),$$

Как видно из рисунков, максимальные напряжения $\tau_{окт}$ концентрируются в угловых точках поверхности сопряжения, а максимальные напряжения $\sigma_{окт}$ на боковых поверхностях сопряжения.

В результате были построены для поверхности сопряжения зоны пластического (8) и хрупкого (9) разрушения вмещающих горных пород при различных соотношениях $\gamma H/\sigma_{сж}$ где $\sigma_{сж}$ – предел прочности горных пород на одноосное сжатие.

В качестве иллюстрации на *рис. 5* показаны зоны разрушения при $\gamma H/\sigma_{сж}$ = 0,6. на *рис. 6* при $\gamma H/\sigma_{сж}$= 0,8 [10].

На *рис. 6* при $\gamma H/\sigma сж=0,8$.

Из анализа рисунков следуют следующие выводы:

– зоны разрушения локализованы вблизи угловых точек и в большей степени в кровле выработки;

– хрупкое разрушение, как правило, связанное с трещинообразованием, возникает на фоне пластического разрушения, когда, очевидно, неупругие деформации достигнут предельного уровня;

– уже при условии $\gamma H/\sigma_{сж}$ = 0,6 и тем более при условии $\gamma H/\sigma_{сж}$ = 0,8 требуется возведение мощной жесткой конструкции крепи на участке сопряжения.

В статье проведено комплексное исследование геомеханических процессов деформирования и разрушения в окрестности сопряжения горизонтальных горных выработок с эллипсоидным и сводчатым поперечным сечением.

С помощью численного метода конечных элементов (МГЭ) выполнен анализ распределения напряжений и деформаций в массиве горных пород, что позволило выявить закономерности возникновения и локализации зон разрушения.

Установлено, что зоны разрушения преимущественно локализуются вблизи углов сопряжения и особенно в кровле выработки. Хрупкое разрушение, связанное с образованием трещин, возникает на фоне пластического деформирования при достижении предельного уровня неупругих деформаций. Это свидетельствует о тесной взаимосвязи процессов деформирования и разрушения, которые органично переходят друг в друга в зависимости от стадии нагрузки на горный массив.

Рассмотрены особенности напряженно-деформированного состояния породного массива при различных соотношениях нагрузки γH и предела прочности $\sigma_{сж}$ на одноосное сжатие. Полученные результаты показывают, что при соотношениях $\gamma H/\sigma_{сж} \geq 0,6$ возникает необходимость в возведении мощных и жёстких крепёжных конструкций на участках сопряжения для предотвращения развития критических разрушений и обеспечения устойчивости выработок.

Работа подчеркивает важность учёта структурно-механических особенностей массива, формы поперечного сечения выработок и начального напряженного состояния для точного прогнозирования геомеханического поведения горных массивов. Предложенный подход и полученные результаты могут быть использованы для повышения безопасности горных выработок и оптимизации проектирования крепи.

Таким образом, исследование вносит значимый вклад в понимание механизмов взаимодействия геомеханических процессов в сложных зонах сопряжения выработок, а также в разработку научно обоснованных рекомендаций по укреплению горных сооружений.

Библиографический список:

1. Фадеев Б.А. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра. 1987. – 236 с.

2. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твёрдого тела. – М.: Мир, 1987. – 236 с.

3. Назаров З.С., Жиянов А.Б., Шарипов Л.О. Оценка главных горизонтальных напряжений по сведениям о геодинамическом районировании близко расположенных месторождений-аналогов // Материалы международной конференции по комплексному инновационному развитию Зарафшанского региона: Достижения, проблемы и перспективы. Навои, Узбекистан, 27-28 октября 2022 г. – С. 174-178.

4. Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Филиппова А.А., Шклярский М.Ф. Изучения проявления горного давления на моделях. – М.: Углетехиздат, 1997. – 283 с.

5. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – С. 98-105.

6. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Sharipov L.O., Nazarov A.Z. Calculation of the pit wall mass by finite element method in the Midas GTS NX software // Science and Education in Karakalpakstan. Karakalpakstan, 2023. – No. 1/2 (31), pp. 29-34.

7. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Sharipov L.O., Sunnatulloev Sh. Application of professor D. Lobshire's geomechanical classification for in-depth zoning of the board of the Amantaytau mine // E3S Web of Conferences. GEOTECH-2023. 417, 01001 (2023), doi.org/10.1051/e3sconf/202341701001

8. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах. – М.: Недра, 1986. – С. 98-102.

9. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1992. – С. 65-69.

10. Покровский Г.И., Федоров И.С. Центробежное моделирование в горном деле. – М.: Недра, 1989. – 247 с.

UO'K 624.078.7

DOI:10.54073/GV.2025.2.102.004

OLTIN VA KO‘MIR KONLARIDA ANKER MUSTAHKAMLASH TEXNOLOGIYASI RIVOJLANISHINING JAHON MIQYOSIDAGI HOLATI

Muminov R.O.,
NDK va TU «Muhandislik mexanikasi» kafedrasi professori, t.f.d.

To‘xtayev B.I.,
NDK va TU «Muhandislik mexanikasi» kafedrasi katta o’qituvchisi

Ushbu maqolada oltin va ko‘mir konlarida anker mustahkamlash texnologiyalari haqida ma’lumotlar keltirilgan. Kon va ko‘mir konlarida yer osti qazilmalarini mustahkamlash usullarining tarixiy rivojlanishi, jumladan, yog‘och, tosh va po‘lat arkali mustahkamlash bosqichlari ko‘rib chiqiladi. Anker mustahkamlashning ushbu an’anaviy usullarga nisbatan iqtisodiy samaradorligi va texnik afzalliklari, xususan, yer osti qazilmalarini mustahkamlash sifatini oshirish, mustahkamlash xarajatlarini kamaytirish va mehnat sarfini optimallashtirish jihatlari ta’kidlanadi. Bugungi kunda anker mustahkamlash jahon miqyosida oltin va ko‘mir konlarida keng qo‘llanilib, yuqori ishlab chiqarish hajmlari va samaradorlikka erishishning muhim omillaridan biriga aylanganligi ta’kidlanadi. Maqolada, shuningdek, anker mustahkamlash texnologiyasining kelgusidagi rivojlanish tendensiyalari, yangi materiallar va mustahkamlash usullarining joriy etilishi, shuningdek, konchilik sharoitlarining murakkablashuvi bilan bog‘liq muammolarni hal qilishdagi istiqbollari ko‘rib chiqilgan.

Kalit so‘zlar: *oltin va ko‘mir konlari, anker, mustahkamlash texnologiyalari, qazib olish ishlari, avariya, ta’mirlash xarajatlari, sintetik smola, texnik-iqtisodiy samaradorlik.*

В данной статье представлена информация о технологиях анкерного крепления в золотодобывающих и угольных шахтах. Рассматривается историческое развитие методов крепления подземных выработок в рудных и угольных шахтах, включая этапы крепления деревом, камнем и стальными арками. Подчеркивается экономическая эффективность и технические преимущества анкерного крепления по сравнению с традиционными методами, в частности, улучшение качества крепления подземных выработок, снижение затрат на крепление и оптимизация трудозатрат. Отмечается, что на сегодняшний день анкерное крепление широко применяется в золотодобывающих и угольных шахтах по всему миру, являясь одним из важных факторов достижения высоких объемов производства и эффективности. В статье также, рассматриваются будущие тенденции развития технологии анкерного крепления, внедрение новых материалов и методов крепления, а также перспективы решения проблем, связанных с усложнением горно-геологических условий.

Ключевые слова: *золоторудные и угольные шахты, анкер, технологии крепления, горные работы, авария, затраты на ремонт, синтетическая смола, технико-экономическая эффективность.*

Bugungi kunda O‘zbekiston Respublikasining milliy iqtisodiyoti va ijtimoiy taraqqiyotida foydali qazilmalar qazib olish strategik ahamiyat kasb etadi. Mamlakatning birlamchi energiya resurslarini ishlab chiqarish va iste’mol qilish balansida kon sanoatining ulushi taxminan 70 % ni tashkil etib, uzoq muddatli istiqbolda ham energiya ta’minotining asosiy manbai bo‘lib qolishi kutilmoqda. Jadal sur’atlar bilan rivojlanayotgan milliy iqtisodiyotimiz sharoitida oltin va ko‘mir sanoatiga bo‘lgan talab tobora ortib bormoqda. Shu sababli, mazkur sanoat tarmog‘ining barqaror, mustahkam va mutanosib rivojlanishini ta’minlash davlat iqtisodiy siyosatining muhim yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi.

O‘zbekistonda oltin va ko‘mir qazib olish ochiq karyer va yer osti shaxta usullarida amalga oshiriladi, bu esa oltin va ko‘mir qatlamlarining murakkab geologik sharoitlari (katta chuqurlikda joylashuvi, gaz dinamik hodisalarning yuqori ehtimoli, nobarqaror tog‘ jinslari) bilan xarakterlanadi. Boshqa sanoat tarmoqlari bilan qiyoslaganda, oltin va ko‘mir qazib olish texnologiyalari, foydalanilayotgan uskunalar va ishlab chiqarish jarayonining xavfsizligiga nisbatan yuqori talablar qo‘yiladi. Yer osti oltin va ko‘mir qazib olish jarayoni katta hajmdagi kon qazilmalarini (shtolnyalar, kvershlaglar, uklonlar, va boshqalar) o‘tkazishni talab etadi. To‘liq bo‘lmagan statistik ma’lumotlarga ko‘ra, O‘zbekistondagi yirik va o‘rta davlatga qarashli oltin va ko‘mir konlarida har yili bir necha kilometr uzunlikdagi yangi kon qazilmalari barpo etiladi [1]. Bunday keng ko‘lamdagi yer osti ishlari boshqa sanoat tarmoqlarida kam uchraydigan holatdir. Shu sababli, kon qazilmalarini mustahkamlashga sarflanadigan xarajatlar, qazish ishlarining tezligi va mustahkamlash tizimlarining ishonchliligi oltin va ko‘mir qazib chiqaruvchi korxonalarda ishlab chiqarishning iqtisodiy samaradorligi va ishchilarning xavfsizligiga bevosita ta’sir ko‘rsatuvchi muhim omillar hisoblanadi. Kon qazilmalarini samarali va ishonchli mustahkamlash texnologiyalarini ishlab chiqish va joriy etish kon sanoatining barqaror rivojlanishi, ishlab chiqarish xarajatlarini optimallashtirish va favqulodda vaziyatlarning oldini olish uchun strategik ahamiyatga ega. O‘tish va qazib olish ishlari oltin va ko‘mir qazib chiqarish siklining muhim bosqichlari hisoblanib, ularning samarali va xavfsiz amalga oshirilishi konlarning umumiy ishonchliligi va yuqori ishlab chiqarish ko‘rsatkichlarini ta’minlashning asosiy shartidir. O‘zbekiston kon va ko‘mir konlaridagi o‘lim holatlari soni dunyoning boshqa yirik oltin va ko‘mir qazib oluvchi mamlakatlariga qaraganda uchrab turadi. O‘lim holatlari, asosan, texnologiya va uskunalar nisbatan eskirgan konlarda sodir bo‘ladi. O‘zbekistondagi oltin va ko‘mir konlaridagi turli xil avariyalar orasida kon yuqori qismining qulashi juda jiddiy muammo hisoblanadi. Oltin va ko‘mir ishlab chiqarish xavfsizligi laxmlarni mustahkamlash, xavfsiz va ishonchli bo‘lishini, atrofdagi tog‘ jinslarining barqarorligini ta’minlashini, kon yuqori qismining qulashi va yon tomonlarning o‘pirilishining oldini olishini talab qiladi.

Mamlakatimizda oltin va ko‘mir konlarini qazib olish chuqurligi yiliga 2-4 *m* tezlikdan oshmoqda. Zarmitan, Angren, Zarafshon kabi hududlarda qazib olish chuqurligi allaqachon 1000m dan oshib ketdi, bir kilometrdan ortiq chuqurlikdagi konlar guruhi paydo bo‘lmoqda. Ko‘mir va oltin

qazib olish texnologiyalaridagi taraqqiyot va konlarni modernizatsiya qilish unumdorlik va samaradorlikning oshishiga yordam beradi, bu esa o‘z navbatida qazib olish chuqurligining oshishini tezlashtiradi. Kelgusi 20 yil ichida davlatimiznning ko‘plab oltin va ko‘mir konlari 1000-1500 *m* chuqurlikka yetishi kutilmoqda. Chuqur qazib olish yuqori tog‘ bosimi sharoitida qazilmalarni mustahkamlash bilan bog‘liq bir qator muammolarni keltirib chiqaradi, masalan, tog‘ zarbalari, atrofdagi tog‘ jinslarining katta deformatsiyalari, tuproqning kuchli ko‘tarilishi va boshqalardir [2].

O‘zbekistonning oltin va ko‘mir konlarida murakkab tog‘-geologik sharoitlar keng tarqalgan. Bunday sharoitlarga ega konlar butun mamlakat bo‘ylab uchraydi, masalan: Zarmitan, Angren, Surxondaryo, Zarafshon. Murakkab tog‘-geologik sharoitlar deyarli barcha asosiy oltin va ko‘mir qazib oluvchi hududlar va tumanlarda uchraydi va konlarning deyarli yarmi bu qiyinchiliklarga duch keladi. Yangi konlarni ishlab chiqish va eski konlarni qazib olish chuqurligining oshishi bilan murakkab tog‘-geologik sharoitlarga ega konlar soni oshadi. Bunday sharoitlarda atrofdagi tog‘ jinslarining barqarorligi pasayadi, deformatsiyalar va buzilishlar yanada jadal bo‘ladi, laxmlarni mustahkamlash esa juda murakkab bo‘ladi. Murakkab tog‘-geologik sharoitlarga ega bo‘lgan ba’zi konlarda bir metr laxmni mustahkamlash narxi 100 000 000-150 000 000 so‘mga yetadi, bu esa konlarning ishlab chiqarishi va iqtisodiy samaradorligiga jiddiy ta’sir qiladi.

Oltin va ko‘mir konlarida laxmlarni mustahkamlash texnologiyasi uzoq rivojlanish yo‘lini bosib o‘tdi: yog‘och mustahkamlash, tosh mustahkamlash va po‘lat arkali mustahkamlashdan anker mustahkamlashgacha. Xorijdagi ko‘p yillik tajriba shuni ko‘rsatadiki, anker mustahkamlash oltin va ko‘mir laxmlarini mustahkamlashning iqtisodiy va samarali usulidir. Ramali mustahkamlash bilan taqqoslaganda, anker mustahkamlash laxmlarni mustahkamlash samaradorligini sezilarli darajada oshiradi, mustahkamlash xarajatlarini kamaytiradi va ishlarning mehnat sig‘imini kamaytiradi. Yanada muhimi, anker mustahkamlash tozalash joylarida yuz bo‘shlig‘ini mustahkamlashni va oldingi mustahkamlashni sezilarli darajada soddalashtirishi, laxmlardagi ta’mirlash ishlari hajmini sezilarli darajada qisqartirishi, tozalash joylarining tez ilgarilash, unumdorlik va samaradorlikni oshirish uchun qulay sharoitlar yaratishi mumkin. Hozirgi vaqtda anker mustahkamlash butun dunyo bo‘ylab oltin va ko‘mir konlarida keng qo‘llaniladi shuningdek oltin va ko‘mir qazib olishning yuqori unumdorligi va samaradorligini ta’minlovchi asosiy texnologiyalardan biri hisoblanadi. Ish maydonlarining bunday yuqori ishlab chiqarish hajmi va o‘yish sur’atining tezlashishi kon qazilmalarini mustahkamlashga misli ko‘rilmagan qat’iy talablarni qo‘yadi; birinchidan, o‘yish sur’atining tezlashishini ta’minlash uchun kon qazilmalarini o‘tkazish sur’ati sezilarli darajada oshirilishi kerak, aks holda o‘yish ishlarining uzluksizligi buzilishi va ish maydonining ishlab chiqarish hajmining pasayishiga olib keladi; ikkinchidan, konlarning barqaror yuqori ishlab chiqarishini ta’minlash uchun ish maydonlariga xizmat ko‘rsatuvchi kon qazilmalarining doimiy ravishda ishlashi ta’minlanishi kerak. O‘tish ishlari olib borilayotgan jarayonda kon qazilmalari asosan ta’mirga muhtoj bo‘lmasligi, mustahkamlash samaradorligi transport, shamollatish va ishchilarning o‘tishi kabi ishlab chiqarish talablariga javob berishi kerak, aks holda kon qazilmalarini ta’mirlash kon laxmlarining o‘tish ishlarining sur’atini sekinlashtiradi, ish maydonining ishlab chiqarish hajmini pasaytiradi va hatto to‘xtab qolishiga olib kelishi mumkin [3].

Kon qazilmalarini kovlash va mustahkamlash oltin va ko‘mir konlari korxonalari xarajatlarining muhim tarkibiy qismidir. Bundan tashqari, kon qazilmalari qurib bitkazilgandan so‘ng, geologik sharoitlarning murakkabligi yoki tog‘ bosimining ta’siri tufayli ularni doimiy ravishda ta’mirlash zarur bo‘ladi. Mamlakatimizdagi ayrim murakkab konlarda kon qazilmalarini ekspluatatsiya qilish jarayonida 3-4 marta ta’mirlash yoki qayta qurishga to‘g‘ri keladi. Kon qazilmalarini ta’mirlash xarajatlari ko‘pincha ularni qurish xarajatlaridan ancha oshib ketadi, kon qazilmalarining xizmat ko‘rsatish davridagi umumiy xarajatlari esa qurilish xarajatlaridan bir necha marta ko‘p bo‘lishi mumkin. Mamlakatimizda oltin va ko‘mir konlarida kon qazish ishlarining miqyosi katta bo‘lganligi sababli, kon qazilmalarini o‘tish va ta’mirlashning umumiy xarajatlari juda yuqori. Shu sababli, oltin va ko‘mir qazib chiqarish talablarini qondirish va kon qazilmalarining xavfsizligini ta’minlash sharti bilan kon qazilmalarini mustahkamlash va ta’mirlash xarajatlarini kamaytirish, hatto agar kamayish miqdori katta bo‘lmasa ham, oltin va ko‘mir konlari korxonalariga katta iqtisodiy foyda keltirishi mumkin. Oqilona kon qazilmalarini mustahkamlash texnologiyasi oltin va ko‘mir konlarining iqtisodiy samaradorligini oshirishning muhim yo‘lidir.

XX asrning 90-yillaridan boshlab yuqori mustahkamlikka ega bo‘lgan sintetik smolali ankerlar o‘zining afzal mustahkamlash samaradorligi va qulay o‘rnatish texnologiyasi tufayli boshqa turdagi ankerlarni bosqichma-bosqich siqib chiqarib, ankerli mustahkamlashning asosiy usuliga aylandi. Ankerlarni sementlash texnologiyasi ham keng qo‘llanila boshlandi. Avstraliya va AQSh kabi mamlakatlarda oltin va ko‘mir konlarining geologik sharoitlari nisbatan oddiy, qazishmalarning chuqurligi sayoz, oltin va ko‘mir qatlamining qalinligi katta bo‘lib, ular ankerli mustahkamlashni keng qo‘llab-quvvatlaydi. Ularning ankerli mustahkamlash texnologiyasi nisbatan ilg‘or bo‘lib, oltin va ko‘mir konlaridagi barcha qazishmalarni mustahkamlashda ankerlarning ulushi deyarli 100% ni tashkil etadi. Aslida, Avstraliya va AQShda, agar konning yuqori (tom) qismi ankerli mustahkamlash uchun yaroqli bo‘lsa, ular boshqa usullarni qo‘llashni iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq emas deb hisoblaydilar. Avstraliyaning ankerli mustahkamlash texnologiyasi nisbatan mukammal tizimni shakllantirgan bo‘lib, oltin va ko‘mir konlaridagi barcha qazishmalar po‘lat tasmalar bilan birgalikda to‘liq ulangan sintetik smolali ankerlar bilan mustahkamlanadi. Garchi qazishmalar kesimining yuzasi katta bo‘lsada, mustahkamlash samaradorligi yaxshidir. Murakkab yuqori (tom) qismi, mo‘rt tom qismi va qazishmalar kesishgan joylar, katta kesim yuzali kameralarni mustahkamlash kabi murakkab sharoitlarda ankerlarni sementlash usuli qo‘shimcha mustahkamlikni ta’minlash va tog‘ jinslarining deformatsiyasini nazorat qilish uchun qo‘llaniladi. Amerika Qo‘shma Shtatlarining oltin va ko‘mir konlarida ankerlarning qo’llanilishi katta bo‘lib, ankerlarning turlari ham xilma-xildir, masalan: mexanik klinli ankerlar, sintetik smolali ankerlar, gibrid ulangan ankerlar, kombinatsiyalashgan mustahkamlash elementlarida po‘lat va armaturalar qo‘llaniladi. Amalda, tog‘ jinslarining sharoitlariga qarab, turli xil mustahkamlash usullari va parametrlari tanlanadi [4].

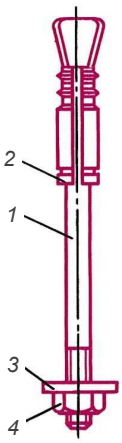
Yevropaning ayrim asosiy ko‘mir qazib oluvchi davlatlari avval asosan metall arkali mustahkamlash usullarini qo‘llab kelgan. Ammo qazishmalarni mustahkamlash murakkabligi va mustahkamlash xarajatlarining oshishi bilan ular qazishmalarni mustahkamlashning ankerli usuliga o‘tib, ankerli mustahkamlash texnologiyalarini tadqiq qilish, sinovdan o‘tkazish va keng qo‘llash bo‘yicha faol ish olib bormoqdalar.

Buyuk Britaniya Yevropaning asosiy ko‘mir qazib oluvchi mamlakatlaridan biri bo‘lib, metall arkali mustahkamlashdan foydalangan mamlakatlarning tipik vakili edi. 1987 yilgacha Buyuk Britaniya ko‘mir konlaridagi qazishmalarning 90% dan ortig‘i metall ramkalar bilan mustahkamlangan, bu esa mustahkamlash samaradorligining pastligi, xarajatlarning yuqoriligi, qazib olish ish yuzidagi ishlab chiqarish va samaradorlikning pasayishi, shuningdek, konlarning iqtisodiy zarar ko‘rishi kabi jiddiy muammolarni keltirib chiqardi. Xalqaro bozordagi keskin raqobat tufayli Buyuk Britaniya ko‘mir sanoati jiddiy inqirozga yuz tutdi. Shunday sharoitda Buyuk Britaniya o‘z ko‘mir sanoatining raqobatbardoshligini oshirishning uchta asosiy strategiyasidan biri sifatida an’anaviy metall ramkali mustahkamlash o‘rniga ankerli mustahkamlashni qat’iy ravishda joriy qila boshladi. 1987 yilda Avstraliyadan ilg‘or ankerli mustahkamlash texnologiyasini import qilgandan so‘ng, Buyuk Britaniyaning ankerli mustahkamlash texnologiyasi tez sur’atlar bilan rivojlandi. 1990 yilga kelib, Buyuk Britaniya ko‘mir konlaridagi barcha qazishmalarni mustahkamlashda

1-jadval

Buyuk Britaniya ankerli mustahkamlash texnologiyasini texnik-iqtisodiy samaradorlik ko‘rsatkichi

Ko‘rsatkichlar	1984 yil	1994 yil
Tozalash joyining o‘rtacha unumdorligi (*t/sut*)	500	4 500
Mehnat unumdorligining o‘rtacha ko‘rsatkichi (*t/kishi·sut*)	3	13,5
Ko‘mirning o‘rtacha tannarxi (*funt/t*)	70	35
Laxmlarni o‘tishning o‘rtacha tezligi (*m/hafta*)	44	>100
Laxmlarni mustahkamlash xarajatlari (%)	100	50
Baxtsiz hodisalar soni (%)	100	10



***1-rasm. Ankerli mustahkamlagich**: 1 – ankerning sterjeni; 2 – ankerning qotiruvchi kallak qismi; 3 – ankerning shaybasi; 4 – ankerning bolti*

ankerlarning ulushi 80 % ga yetdi, bu ko‘rsatkich 1980-yillarning o‘rtalarida deyarli nolga teng edi. 1994 yilda bu ko‘rsatkich 80 % ni, 1997 yilda esa 90 % ni tashkil etdi. Buyuk Britaniya ankerli mustahkamlash texnologiyasini keng joriy qilish orqali sezilarli darajada texnik-iqtisodiy samaradorlikka erishdi (*1-jadval*) [5].

Qazishmalarni mustahkamlash xarajatlari va bir tonna ko‘mirning tannarxi pasaydi, qazib olish ish yuzidagi ishlab chiqarish hajmi va ishchilarning umumiy samaradorligi sezilarli darajada oshdi, avariyalar soni keskin kamaydi va qazishmalarning xavfsizlik holati ta’minlandi. Hatto bir qator yopilish arafasida turgan konlar ham shu tufayli qayta tiklandi. Buyuk Britaniyada ankerli mustahkamlash ko‘mir konlaridagi qazishmalarni mustahkamlash texnologiyasidagi inqilobiy o‘zgarish sifatida qabul qilindi va bu o‘zgarish qisqa vaqt ichida ko‘mir sanoatiga bunchalik katta foyda keltirgan boshqa texnologiya o‘zgarishi bo‘lmaganligi ta’kidlandi.

Boshqa ko‘mir qazib oluvchi davlatlarning ankerli mustahkamlash texnologiyalarini rivojlantirish sur’atlari ham tez bo‘ldi. Masalan, Fransiyada 1986 yilga kelib barcha qazishmalarni mustahkamlashda ankerlarning ulushi 50 % dan oshdi. Rossiyada turli xildagi ankerlar ishlab chiqildi va Rossiyaning eng yirik konlaridan biri bo‘lgan Vorkuta ko‘mir konidagi barcha qazishmalarni mustahkamlashda ankerlarning ulushi 50 % dan ortiqni tashkil etdi [6].

Ankerli mustahkamlash materiallari anker sterjni, tayanch plastinkasi, gayka, anker qotiruvchi moddasi (smolali yoki sementli), po‘lat tasma (yoki armaturali tasma), metall to‘r, anker setkalari va boshqalarni o‘z ichiga oladi (*1-rasm*).

Anker sterjni, odatda, yuqori mustahkamlikka ega bo‘lgan po‘latdan tayyorlanadi. Uning geometrik parametrlari (diametri, uzunligi, tishli yoki silliq yuzasi) mustahkamlanayotgan muhitning fizik-mexanik xususiyatlari (mustahkamligi, yoriqliligi, suvliligi va boshqalar) va kutilayotgan yuklamalarga bog‘liq holda aniqlanadi. Tishli yuza sterjenning anker qotiruvchi modda bilan mustahkam bog‘lanishini ta’minlaydi va siljishga qarshiligini oshiradi. Sterjenning mustahkamlik chegarasi va cho‘ziluvchanlik xususiyatlari tanlangan mustahkamlash usulining ishonchliligini belgilovchi asosiy omillardan biridir. Tayanch plastinkasining shakli va o‘lchamlari yuklamaning taqsimlanish xususiyatiga va mustahkamlanayotgan yuzaning mustahkamligiga moslashtiriladi. Plastinkaning yetarlicha qattiqligi deformatsiyalanishning oldini oladi va kuchning bir tekisda uzatilishini ta’minlaydi. Gaykaning materiali va rezbasi sterjenning materiali va rezbasiga mos kelishi kerak. Gaykaning burab qotirilishi natijasida hosil bo‘lgan taranglik kuchi mustahkamlash samaradorligini oshirishda muhim rol o‘ynaydi (*1-rasm*). Anker qotiruvchi modda sifatida odatda sement asosidagi qorishmalar, polimer smolalar yoki boshqa maxsus kompozitsiyalar qo‘llaniladi. Qotiruvchi moddaning mustahkamlik ko‘rsatkichlari (bosishga va yeyilishga qarshiligi), adgeziya xususiyatlari (sterjen va tog‘ jinsi, tuproq bilan bog‘lanish qobiliyati), oqinuvchanligi va qotish vaqti muhim parametrlar hisoblanadi. Qotiruvchi moddaning reologik xususiyatlari (oqish vaqti, qovushqoqligi) teshikni to‘liq va sifatli to‘ldirish uchun ahamiyatlidir. Po‘lat tasma va metall to‘rning mustahkamligi, egiluvchanligi va korroziyaga chidamliligi muhim xususiyatlardir. To‘rning ko‘zchalarining o‘lchamlari va simning qalinligi mustahkamlanayotgan muhitdagi bo‘laklarning o‘lchamlariga va kutilayotgan bosimga moslashtiriladi. Po‘lat tasmalar esa to‘mi yuzaga mahkamlash va qo‘shimcha taranglik hosil qilish uchun ishlatilishi mumkin. Ularning mustahkamligi va uzunchoqligi yuza deformatsiyalariga moslashish imkonini beradi.

Agar anker bolti alohida ko‘rib chiqilsa, uning bo‘ylama o‘lchami ko‘ndalang o‘lchamlaridan sezilarli darajada katta bo‘lganligi sababli, mexanika fani nuqtai nazaridan uni uzunchoq sterjen sifatida talqin etish mumkin. Mazkur konstruktiv element asosan ikkita asosiy mexanik funksiyani bajaradi:

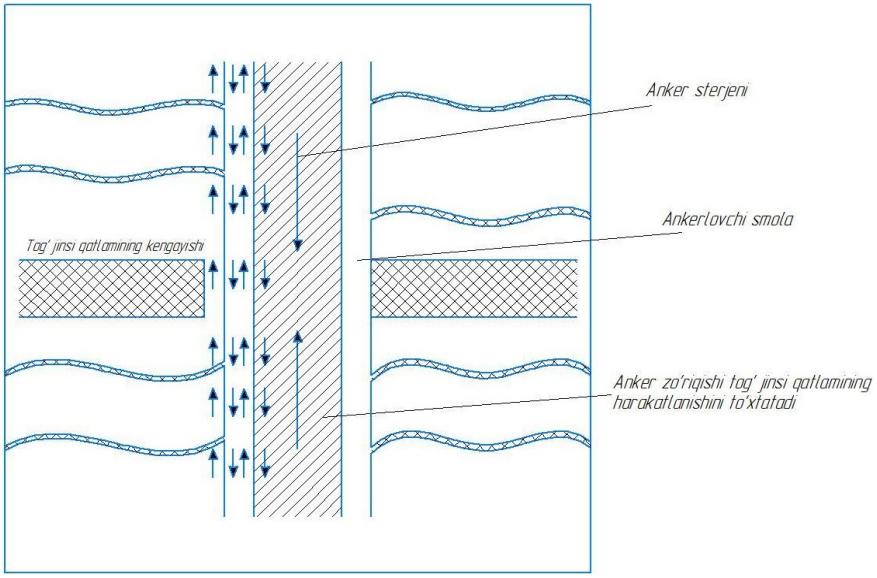
Cho‘zilishga qarshilik ko‘rsatish: Anker boltining asosiy vazifasi tog‘ massividagi cho‘ziluvchi kuchlanishlarni qabul qilish va ularni mustah-kamroq bo‘lgan ichki qatlamlarga yoki mustahkamlash plitasi orqali kengroq maydonga samarali tarzda uzatishdan iborat. Bu orqali qazilma atrofidagi nobarqaror zonalarda yoriqlarning ochilishi va rivojlanishining oldi olinadi, shuningdek, tog‘ jinslarining bo‘linib ketishi (dekompressiya) jarayonlari cheklanadi.

Siljishga qarshilik ko‘rsatish: Anker bolti, shuningdek, tog‘ qatlamlarining bir-biriga nisbatan siljishiga qarshilik ko‘rsatish qobiliyatiga ham ega. Ayniqsa, geologik buzilishlar (yoriqlar, siljish yuzalari) mavjud bo‘lgan zonalarda anker boltlari bu yuzalar bo‘ylab yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan siljish deformatsiyalarini cheklash va oldini olishda muhim rol o‘ynaydi. Bu funksiya, ayniqsa, anker boltining tog‘ jinsi bilan mustahkamlovchi tarkib (smola, sement) orqali kontakt yuzasida yuzaga keladigan adgeziya va ishqalanish kuchlari hisobiga ta’minlanadi. Anker sterjnining egilishga va siqilishga qarshilik ko‘rsatish qobiliyati nisbatan kichik bo‘ladi. Buning sababi, sterjenning bo‘ylama o‘lchami uning ko‘ndalang o‘lchamlaridan ancha katta bo‘lganligi uchun, egilish va siqilish deformatsiyalariga nisbatan u ancha nozik element hisoblanadi. Shu sababli, muhandislik hisob-kitoblarida bu qarshiliklarni ko‘pincha e’tiborga olmaslik mumkin. Ammo, agar sterjen juda uzun va nozik bo‘lsa, unda siqilishga qarshilikni yo‘qotish va bukchayish holati yuzaga kelishi mumkinligini ham nazarda tutish lozim. Anker sterjni mexanik tahlilda bir o‘lchamli sterjen elementi sifatida qaraladi va asosan cho‘zilish va kesilish yuklamalariga qarshilik ko‘rsatishga mo‘ljallangan. Egilish va siqilishga qarshiligi esa, geometrik xususiyatlari tufayli, ko‘p hollarda inobatga olinmaydi. Biroq, muayyan sharoitlarda (masalan, katta ko‘ndalang yuklanishlar yoki notekis tog‘ bosimi) bu qobiliyatlar ham muayyan darajada namoyon bo‘lishi mumkin [7].

Ankerli mustahkamlash materiallarining mexanik xususiyatlari mustahkamlash loyihasining talablariga javob berishi kerak, shu bilan birga, turli xil mexanik xususiyatlarga ega bo‘lgan materiallar o‘zaro muvofiq kelishi va ankerli mustahkamlash tizimining umumiy samaradorligini maksimal darajada ta’minlashi lozim. Ankerli mustahkamlashni o‘rnatish uskunalari va texnologiyasi qazishmalarni mustahkamlash sifatini ta’minlash va o‘tkazish tezligini oshirishning muhim bo‘g‘ini hisob-lanadi. O‘rnatish uskunalariga anker burg‘ilash mashinalari, burg‘ilash kallaklari, anker o‘rnatish moslama-lari, ankerlar (yoki setkalar)ni oldindan

zo‘riqtirish uskunalari va boshqalar kiradi. O‘rnatish texnologiyasi uskuna-larni oqilona joylashtirish, ish jara-yonini to‘g‘ri tashkil etish, mehnatni muvofiqlashtirish va boshqalarni o‘z ichiga oladi. Faqat qazishmaning aniq geologik sharoitlari va ishlab chiqarish talablarini hisobga olgan holda, mos keluvchi uskunalar va tegishli o‘rnatish texnologiyasini tanlash orqaligina mustahkamlash sifatini ta’minlash bilan birga qazishmalarni o‘tkazish tezligini oshirish mumkin.

Ankerli mustahkamlash yashirin muhandislik ishi bo‘lib, o‘rnatish ishlari tugagandan so‘ng to‘liq va tizimli sifat nazorati o‘tkazilmasa, mavjud muammolarni aniqlash qiyinlashib, xavfsizlikka tahdid soladi. Ankerli mustahkamlash ishlarining sifatini nazorat qilish asosan ankerlar (yoki setkalar)ni o‘rnatishning geometrik parametrlari, mexanik xususiyatlari va barcha elementlarning o‘rnatish sifatini tekshirishlarni o‘z ichiga oladi. Geometrik parametrlarga ankerlar (yoki setkalar) orasidagi masofa, qatorlar orasidagi masofa, ankerlar (yoki setkalar)ni o‘rnatish burchagi, ankerlarning (yoki setkalarning) ochiq qismining uzunliglarini o‘z ichiga oladi. Mexanik xususiyatlarga anker sterjnlarining cho‘zilish mustahkamligi, ankerlarning (yoki setkalarning) oldindan zo‘riqtirish kuchlari kiradi.



2-rasm. Ankerning tog‘ massivi ichiga o‘rnatilishi sxemasi

Ankerli mustahkamlash mexanizmini tadqiq qilishdan maqsad qazishmaning deformatsiyasi va buzilishining xususiyatlari va qonuniyatlarini, ankerli mustahkamlash konstruksiyasining ishlash prinsiplarini, ankerlarning tog‘ jinslari bilan o‘zaro ta’siri va bunga ta’sir etuvchi omillarni aniqlashdan iborat bo‘lib, bu ankerli mustahkamlashni loyihalashtirish uchun nazariy asos yaratadi. Ankerli mustahkamlash mexanizmini va qazishma atrofidagi tog‘ jinslarining mexanik xususiyatlari bo‘yicha sinovlar natijalarini to‘liq o‘rganish asosida ankerli mustahkamlashning dastlabki loyihasi ishlab chiqiladi. Loyiha qazishmaning kesimining o‘lchamlari, mustahkamlanadigan oltin qatlamining qalinligi, ankerli mustahkamlashning shakli va mustahkamlash parametrlari kabi mazmunlarni o‘z ichiga oladi. Hozirgi vaqtda ankerli mustahkamlashni loyihalashtirishning ko‘plab usullari mavjud, masalan, empirik usul, nazariy hisoblash usuli, sonli modellashtirish usuli va joyida kuzatish usuli. Ankerli mustahkamlashni loyihalashtirishning samarali usuli ikkita shartga javob berishi kerak: taqdim etilgan ankerli mustahkamlash shakli va parametrlari oqilona, ishonchli va mustahkamlash samaradorligi hamda xavfsizlik darajasini ta’minlashi kerak, shu bilan birga mustahkamlash xarajatlari eng past bo‘lishi lozim; loyihalash usuli kon muhandislik-texnik xodimlari uchun tushunarli, qulay va oson o‘zlashtiriladigan bo‘lishi kerak, bu esa ularga mustaqil ravishda loyihalashtirish imkonini beradi va *2-rasmda* keltirilgan [8].

2-rasmda (sxemada) smolali anker misolida anker boltining asosiy funksiyalari vizual ravishda tasvirlangan. Ushbu rasmda ankerning tog‘ massivi ichiga o‘rnatilishi, cho‘zilish kuchlari ta’siridagi holati va siljish yuzalarini kesib o‘tib, ularning harakatini cheklashi yaqqol ko‘rsatilgan. Smolali ankerlarda mustahkamlovchi tarkibning roli alohida ta’kidlangan bo‘lib, u anker va tog‘ jinsi o‘rtasidagi mustahkam bog‘lanishni ta’minlab, yuklanishning samarali uzatilishiga xizmat qiladi. Taqdim etilgan *2-rasmda* tog‘ massivida kuzatilishi mumkin bo‘lgan geotexnik nobarqarorlik holati, xususan, tog‘ jinsining hajm o‘zgarishi (shishishi) va buning natijasida yuzaga keladigan deformatsiyalar aks ettirilgan. *2-rasmda*, shuningdek, anker mustahkamlash elementi – anker sterjenining mazkur nobarqaror-likka qarshilik ko‘rsatish mexanizmi ham tasvirlangan. Anker sterjeni, avvaldan tortish kuchi natijasida hosil qilingan ushbu kuch tufayli, tog‘ jinsining harakatiga aktiv qarshilik ko‘rsatuvchi kuch hosil qiladi. Bunda polimer ankerlovchi tarkib muhim rol o‘ynaydi. U anker sterjeni bilan tog‘ massivi o‘rtasida yuqori adgezion mustahkamlikdagi ishonchli mexanik bog‘lanishni ta’minlab, avvaldan tortish kuchining atrofdagi mustahkam tog‘ qatlamlariga samarali transfertini amalga oshiradi. Amaliyotda anker mustahkamlash elementlari ko‘pincha bir vaqtning o‘zida ham cho‘zilish, ham siljish holatlarida ishlashi mumkin. Anker boltining mustahkamlash samaradorligi bir qator muhim omillarga bog‘liq bo‘ladi, jumladan:

1. Anker materialining mexanik xossalari: (mustahkamlik chegarasi, elastiklik moduli, cho‘ziluvchanlik).
2. Tog‘ jinsining mustahkamlanish zonasidagi fizik-mexanik parametrlari: (mustahkamlik, yoriqlik darajasi, g‘ovaklik, suvga to‘yin-ganlik darajasi).
3. Ta’sir etuvchi yuklamalarning xarakteri: (miqdori, yo‘nalishi, taqsimlanishi, dinamik yoki statikligi).
4. Ankerning konstruksiyasi va o‘lchamlari: (diametri, uzunligi, profili).
5. Ankerlovchi tarkibning xossalari: (adgeziya mustahkamligi, qovushqoqlik, qotish vaqti).
6. O‘rnatish texnologiyasining sifati.

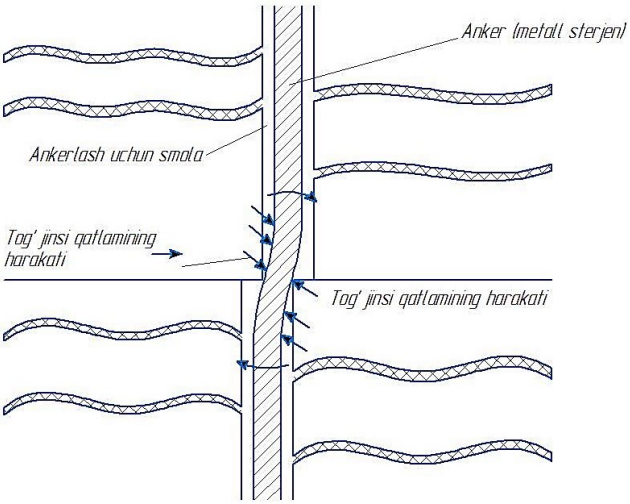
Polimer ankerlovchi tarkiblar o‘zlarining yuqori mexanik mustahkamligi va tog‘ jinsi yuzasi bilan yaxshi adgeziyalanish (yopishish) qobiliyati tufayli ankerning tog‘ massivida ishonchli va uzoq muddatli mustahkamlanishini ta’minlaydi. Ular anker sterjenidan tog‘ jinsiga yuklamaning bir tekisda taqsimlanishiga yordam beradi va kontakt yuzasidagi kuchlanish konsentratsiyasini kamaytiradi [9].

Anker sterjeni barqaror va mustahkam tog‘ jinsi qatlamiga chuqur o‘rnatiladi (*3-rasm*). Nobarqaror yoki potensial qulashi mumkin bo‘lgan kamroq barqaror qatlam anker tomonidan osilib turadi va uning pastga harakatiga qarshilik ko‘rsatiladi. Bu holatda anker asosan cho‘zilish kuchlarini qabul qiladi.

Agar anker geologik yoriq yoki siljish yuzasi bo‘ylab o‘rnatilgan bo‘lsa, u tog‘ jinsi bloklarining bir-biriga nisbatan siljishining oldini oladi. Bunda anker sterjeni yoriq yuzasi bo‘ylab yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan siljish deformatsiyalariga qarshilik ko‘rsatadi. Ankerning siljishga qarshilik ko‘rsatish qobiliyati uning kesish yuzasidagi mustahkamligi va ankerlovchi tarkib bilan kontakt yuzasidagi adgeziya kuchlariga bog‘liq bo‘ladi.

Taqdim etilgan *3-rasmda* anker mustahkamlash elementining tog‘ jinsi qatlamlarining nisbiy siljishiga qarshilik ko‘rsatish mexanizmi prinsipial tarzda tasvirlangan.

Sxemada ankerning oldindan burg‘ilangan shpurga o‘rnatilishi va maxsus kimyoviy mustahkamlovchi tarkib (smola) yordamida tog‘ massivida mahkamlanishi ko‘rsatilgan.



3-rasm. Anker mustahkamlash elementining tog' jinsi qatlamlarining nisbiy siljishiga qarshilik ko'rsatish mexanizmining prinsipial sxemasi

Tog' jinsi qatlamlarida tektonik kuchlar, kon ishlarining ta'siri yoki boshqa geologik omillar natijasida nisbiy harakatlanish (siljish) yuzaga kelganda (sxemada o'qlar bilan ko'rsatilgan), smola bilan mustahkamlangan anker bu harakatga passiv qarshilik ko'rsatadi va tog' massivining yaxlitligini saqlab turishga xizmat qiladi.

Anker atrofidagi shtrixlangan qismi (*3-rasm*) yuklamaning tog' jinsiga taqsimlanish zonasini yoki ankerning atrofdagi tog' massiviga mexanik ta'sir ko'rsatish radiusini ifodalaydi. Ankerga tushayotgan kuchlanishlar aynan shu zona orqali tog' massiviga uzatiladi va taqsimlanadi. Shtrixlangan sohaning o'lchamlari va shakli ankerning tipiga, mustahkamlovchi tarkibning xossalariga va tog' jinsining fizik-mexanik parametrlariga bog'liq bo'ladi. Yuklamaning kengroq taqsimlanishi ankerning samaradorligini oshiradi va tog' jinsidagi mahalliy kuchlanish konsentratsiyasini kamaytiradi. Sxemadagi o'qlar tog' jinsi qatlamlarining potensial siljish yo'nalishlarini ko'rsatadi. Anker, yoriq yoki siljish yuzasini kesib o'tib, bu harakatga ko'ndalang qarshilik ko'rsatadi. Ankerning siljishga qarshilik ko'rsatish qobiliyati uning materialining kesish mustahkamligiga, ankerlovchi tarkib bilan kontakt yuzasidagi adgeziya kuchlariga va ankerning siljish yuzasiga nisbatan joylashish burchagiga bog'liq bo'ladi. Smolali ankerning tog' jinsiga mustahkam bog'lanishi natijasida hosil bo'lgan mexanik qulflanish tog' qatlamlarining bir-biriga nisbatan siljishini samarali ravishda cheklaydi. Ankerning atrofidagi yuklama taqsimlanish zonasi qanchalik keng bo'lsa, tog' massivining barqarorligi shunchalik yuqori bo'ladi. Anker mustahkamlash tizimining samaradorligini oshirish uchun ankerning optimal parametrlarini (uzunligi, diametri, o'rnatish burchagi, zichligi) va mustahkamlovchi tarkibning xossalarini tog' jinsining geotexnik sharoitlarini hisobga olgan holda tanlash muhim ahamiyatga ega. Anker sterjenlari qurilish va tog'-kon sanoatida keng qo'llaniladi. Ularning asosiy vazifasi tuproq va tog' massivini mustahkamlash, shuningdek, ko'chkilar, tosh qulashlari va boshqa geotexnik deformatsiyalarning oldini olishdan iboratdir. Anker mustahkamlash elementlarining funksiyalari va samaradorligini chuqur o'rganish tog'-kon va qurilish sohalarida xavfsiz va ishonchli mustahkamlash tizimlarini loyihalashtirish va amaliyotga tatbiq etish uchun muhim ahamiyatga ega [10].

Anker boltining cho'zilishga qarshilik ko'rsatish qobiliyatini aniqlash muhim muhandislik vazifasi bo'lib, u mustahkamlash tizimining ishonchliligini ta'minlashda asosiy rol o'ynaydi. Anker bolti ko'tara oladigan kritik cho'zilish yuklamasi quyidagi empirik formula orqali taxminan hisoblanishi mumkin:

$$P = \frac{\pi d^2}{4}\sigma_h \mu, \qquad (1)$$

Bu yerda: *P* – anker boltining buzuvchi cho'zilish yuklamasi, *kN*. Bu ankerning mexanik buzilishiga olib keladigan maksimal cho'zilish kuchini ifodalaydi; *d* – anker boltining nominal diametri, mm. Anker sterjenining ko'ndalang kesimining o'rtacha diametri; σ_h – anker materialining cho'zilishdagi mustahkamligi chegarasi, *MPa*. Bu anker materialining cho'zilishga qarshilik ko'rsatish bo'yicha eng yuqori kuchlanish darajasini bildiradi. Materialning pasporti yoki laboratoriya sinovlari orqali aniqlanadi; μ – xavfsizlik omili koeffitsienti. Amaldagi yuklamalarning hisoblangan buzuvchi yuklamadan past bo'lishini ta'minlash uchun kiritiladigan koeffitsient. Xavfsizlik omili konchilik sharoitlarining murakkabligi, yuklanishlarning noaniqligi va mustahkamlash tizimining ahamiyatiga qarab belgilanadi (odatda 1,5 dan 3 va undan yuqori bo'lishi mumkin).

Anker boltining cho'zilishga ko'tarish qobiliyatini aniqlashda e'tiborga olinishi lozim bo'lgan asosiy omillar qo'yidagilardan iborat:

Anker materialining fizik-mexanik xossalari: Ankerning kimyoviy tarkibi, ishlab chiqarish texnologiyasi va termik ishlov berilishi uning mustahkamlik ko'rsatkichlariga (cho'zilish mustahkamligi chegarasi, elastiklik moduli, cho'ziluvchanlik) bevosita ta'sir ko'rsatadi. Yuqori mustahkamlikka ega bo'lgan po'lat markalaridan tayyorlangan ankerlar kattaroq cho'zilish yuklamalarini ko'tara oladi.

Ankerning ko'ndalang kesimi yuzasi: Cho'zilishga qarshilik ko'rsatish qobiliyati ankerning ko'ndalang kesimi yuzasiga proporsionaldir. Kattaroq diametrga ega bo'lgan ankerlar kattaroq kesim yuzasiga ega bo'lib, shunga mos ravishda yuqoriroq cho'zilish yuklamalarini ko'tara oladi. Formuladagi $4\pi d^2$ ifodasi aynan ankerning ko'ndalang kesimi yuzasini hisoblash uchun qo'llaniladi.

Tog' jinsining mustahkamligi va ankerlovchi tarkibning adgezion qobiliyati: Ankerning tog' massivida ishonchli mustahkamlanishi uning cho'zilish yuklamasini samarali qabul qilishi va uzatishi uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. Ankerlovchi tarkib (smola, sement) bilan tog' jinsi va anker o'rtasida hosil bo'ladigan adgezion mustahkamlik ankerning siljishga qarshiligini ta'minlaydi va cho'zilish yuklamasi ostida uning tog' jinsidan chiqib ketishining oldini oladi. Tog' jinsining past mustahkamligi yoki ankerlovchi tarkibning yetarli bo'lmagan adgeziyasi ankerning cho'zilishga bo'lgan haqiqiy ko'tarish qobiliyatini sezilarli darajada pasaytirishi mumkin. *Ta'sir etuvchi yuklamalarning kattaligi va yo'nalishi:* Ankerga ta'sir etuvchi yuklamalarning miqdori va yo'nalishi uning cho'zilishga bo'lgan qarshiligini baholashda muhim rol o'ynaydi. Ankerga to'g'ridan-to'g'ri cho'zilish bo'yicha yo'nalgan yuklamalar uning hisoblangan cho'zilish mustahkamligi chegarasiga yaqin bo'lgan qiymatlarda buzilishiga olib kelishi mumkin. Agar yuklama burchak ostida yoki ko'ndalang yo'nalgan bo'lsa, ankerda qo'shimcha egilish va siljish kuchlanishlari yuzaga kelishi mumkin, bu esa uning cho'zilishga bo'lgan umumiy ko'tarish qobiliyatini pasaytiradi.

Anker boltining cho'zilishga ko'tarish qobiliyatini hisoblashda yuqoridagi barcha omillarni kompleks ravishda hisobga olish zarur. Formula (1) anker materialining mustahkamligi va kesimi yuzasiga asoslangan ideallashtirilgan holatni ifodalaydi. Amaldagi sharoitlarda ankerning haqiqiy ko'tarish qobiliyati tog' jinsining xossalari, ankerlovchi tarkibning sifati va yuklanishlarning xarakteri kabi boshqa omillar ta'sirida sezilarli darajada farq qilishi mumkin. Shu sababli, muhandislik loyihalarida anker mustahkamlash tizimlarini hisoblashda tegishli xavfsizlik omillarini qo'llash va zarurat tug'ilganda joy sharoitida sinovlar o'tkazish tavsiya etiladi [11].

Anker boltining siljish deformatsiyalariga qarshilik ko'rsatish qobiliyatini aniqlash tog' massividagi yoriqlar bo'ylab siljishlarning oldini olish va mustahkamlangan kon inshootlarining barqarorligini ta'minlashda muhim ahamiyatga ega. Anker bolti ko'tara oladigan kritik siljish yuklamasi quyidagi empirik formula orqali taxminan hisoblanishi mumkin:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4}\varphi_h \mu, \qquad (2)$$

Bu yerda: *Q* – anker boltining buzuvchi siljish yuklamasi, *kN*.

Bu ankerning ko‘ndalang kesimi bo‘yicha mexanik buzilishiga olib keladigan maksimal siljish kuchini ifodalaydi; *d* – anker boltining nominal diametri, mm. Anker sterjenining ko‘ndalang kesimining o‘rtacha diametri; φ_h – anker materialining siljish mustahkamligi chegarasi, *MPa.* Bu anker materialining ko‘ndalang kesimi bo‘yicha siljishga qarshilik ko‘rsatish bo‘yicha eng yuqori kuchlanish darajasini bildiradi; μ – xavfsizlik omili. Amaldagi siljish yuklamalarining hisoblangan buzuvchi yuklamadan past bo‘lishini ta’minlash uchun kiritiladigan koeffitsient. Xavfsizlik omili konchilik sharoitlarining murakkabligi, yuklanishlarning noaniqligi va mustahkamlash tizimining ahamiyatiga qarab belgilanadi (odatda 1,5 dan 3 va undan yuqori bo‘lishi mumkin).

Muhandislik amaliyotida ankerlar ko‘pincha nafaqat cho‘zilish, balki siljish yuklari ta’siriga ham duch kelishadi. Masalan, tog‘ jinslarining siljishi yoki konstruksiya elementlarining o‘zaro ta’siri natijasida ankerda siljish kuchlari paydo bo‘lishi mumkin. Shu sababli, ankerli mustahkamlash tizimlarini loyihalashda ankerning siljishga qarshilik ko‘rsatish qobiliyatini ham hisobga olish muhimdir. Ko‘pgina metallar, jumladan po‘lat kabi plastik materiallar uchun siljish mustahkamligi chegarasi (φ_h) va cho‘zilish mustahkamligi chegarasi (σ_h) o‘rtasida muayyan empirik bog‘liqlik mavjud. Materiallar qarshiligi nazariyasiga ko‘ra, ko‘pgina metallar uchun siljish mustahkamligi (φ_h) cho‘zilish mustahkamligi (σ_h) bilan chamalab quyidagi munosabatda bo‘ladi [12]:

$$\varphi_h \approx (0{,}5-0{,}7)\sigma_h \qquad (3)$$

Muhandislik hisob-kitoblarida ko‘pincha o‘rtacha qiymat – 0,7 qabul qilinadi. Bu nisbat materialning ichki molekulyar bog‘lanishlarining siljish va cho‘zilish deformatsiyalariga qarshilik ko‘rsatish mexanizmining o‘ziga xosligi bilan izohlanadi. Aniq qiymat materialning turiga va boshqa omillarga bog‘liq bo‘lishi mumkin. Shuning uchun, aniq loyiha hisoblarida po‘latning siljish mustahkamligi bo‘yicha maxsus ma’lumotlarga ega bo‘lish tavsiya etiladi. Ilmiy jihatdan, ushbu (2) formula ham bir jinsli va izotrop materiallar uchun soddalashtirilgan taxminiy natija beradi. Shunday qilib, anker materialining cho‘zilish mustahkamligi ma’lum bo‘lsa, uning siljish mustahkamligini taxminan aniqlash mumkin. Formula (2) anker boltining ko‘ndalang kesimi bo‘yicha siljishga qarshilik ko‘rsatish qobiliyatini baholash uchun ishlatiladi. Amalda, anker ko‘pincha tog‘ jinsi qatlamlarining siljish yuzalarini kesib o‘tadi va aynan shu kesish yuzasida siljish deformatsiyalariga qarshilik ko‘rsatadi.

Xulosa. Shunday qilib, ankerli mustahkamlashning ta’sir mexanizmini o‘rganish shuni ko‘rsatdiki, ankerlar qazishma atrofidagi tog‘ jinslarining mustahkamligini, tog‘ jinslari massivining yaxlitligini va tog‘ bosimining holatini turli darajada yaxshilaydi: ankerlar tog‘ jinslarini mustahkamlagandan so‘ng, tog‘ jinslarining mustahkamligi, elastiklik moduli, birikish kuchi va ichki ishqalanish burchagi kabi mexanik parametrlari ortadi; ankerlar tog‘ jinslari massividagi uzilishlarning mustahkamligini oshiradi, uzilishlar bo‘ylab siljish va surilishning oldini oladi, tog‘ jinslari massivining umumiy mustahkamligi va yaxlitligini oshiradi; ankerlar tog‘ jinslari massiviga ma’lum darajada siqish kuchini beradi, tog‘ bosimining holatini yaxshilaydi. Ankerning asosiy ta’siri tog‘ jinslari massivining o‘zini mustahkamlash qobiliyatini faollashtirishdan iborat. Ankerlar tog‘ jinslari massivida yoriqlar va darzlarning ochilishini, strukturaviy yuzalar bo‘ylab ajralish va siljishning oldini oladi, tog‘ jinslari massivining yaxlitligini maksimal darajada saqlaydi va qazishma atrofidagi tog‘ jinslarining katta deformatsiyalanishining oldini oladi. Yuqori mustahkamlik va yuqori oldindan zo‘riqtirishga ega bo‘lgan ankerli mustahkamlash tizimlari keng e’tirof etiladi, bunda nafaqat ankerlarning mustahkamligiga, balki mustahkamlash tizimining qattiqligi va umumiy ta’siriga, ayniqsa, ankerlarning oldindan zo‘riqtirish kuchining hal qiluvchi roliga va mustahkamlash elementlarining birikkan holda ishlashining muhimligiga katta e’tibor qaratiladi, bu esa ankerli mustahkamlashni haqiqiy faol va o‘z vaqtida amalga oshiriladigan mustahkamlash usuliga aylantiradi. Ankerli mustahkamlashning samaradorligi yuqorida keltirilgan har bir elementning to‘g‘ri tanlanishi, sifatli ishlab chiqarilishi va to‘g‘ri o‘rnatilishiga bog‘liq.

Ushbu elementlarning birgalikdagi faoliyati tog‘ jinslari va tuproq massivlarining barqarorligini ta’minlashda muhim ahamiyatga ega. Mustahkamlash tizimini loyihalashda muhandislar muhitning geologik-muhandislik sharoitlarini, kutilayotgan yuklamalarni va mustahkamlash-ning maqsadini hisobga olgan holda eng optimal yechimni tanlashlari lozim.

Ko‘p yillik tadqiqotlar va amaliyotlar asosida hozirgi vaqtga kelib xorijiy mamlakatlarda oltin va ko‘mir kazib olish laxmlarining anker mustahkamlash texnologiyasi o‘ziga xos xususiyatlarga ega bo‘lib shakllandi. Anker mustahkamlash oltin va ko‘mir laxmlari uchun asosiy, xavfsiz va samarali mustahkamlash usuliga aylandi. Bu kompleks mexanizatsiyalashgan qazib olish joriy etilganidan keyin oltin va ko‘mir qazib olish texnologiyalari sohasidagi yana bir inqilobiy yutuqdir. Bu texnologiya konlarni ishlab chiqish va qazilmalarni joylashtirish usullarini tubdan o‘zgartirib, yuqori unumdorlik va samarali konlar qurilishida, oltin va ko‘mir qazib olishning keskin oshishida va iqtisodiy samaradorlikni oshirishda muhim rol o‘ynaydi.

Bibliografik ro'yxat:

1. Peng S.S. Longwall mining. CRC Press, 2019. Available from: https://doi.org/10.1201/9780429260049.

2. Сидоренко А.А., Апарин А.Г., Дмитриев П.Н. Совершенствование методики расчета параметров анкерной крепи выработок угольных шахт в зонах влияния сближенных угольных пластов // Известия высщих учебных заведений. Горный журнал. 2022 г 3: стр. 82–94 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-82-94.

3. Ataqulov L.N., Muminov R.O., Maxmudov SH.A. Kon elektromexanik uskunalarini ishlatish // O'quv darslik – Navoiy.: Navoiy nashriyoti, 2023. – 300 bet.

4. Sui W., Hang Y., Ma L., Wu Z., Zhou Y., Long G., Wei L. Interactions of overburden failure zones due to multiple-seam mining using longwall caving. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2015. 74: 1019–1035. Available from: https://doi.org/10.1007/s10064-014-0674-9.

5. Ataullayev A.O., Axmedov X.I., Muminov R.O., Isayev D.T., Oripov Z.B. Mashinasozlik texnologiyasi asoslari // O'quv qo'llanma. – Navoiy.: Navoiy nashriyoti, 2023. – 228 bet.

6. Muminov R.O., Egamberdiyev I.P., Ochilov U.Yu. Kompyuterli loyihalash // O'quv qo'llanma. – Navoiy.: Navoiy nashriyoti. 2023. – 272 bet.

7. Карсакова Н.З., Шеров К.Т., Абсадыков Б.Н., Сихимбаев М.Р., Туссупбекова Г.М. Вопросы совершенствования технологии обработки отверстий большого диаметра крупногабаритных деталей технологического оборудования. // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан, Серия геологии и технических наук. 2023 (2), с. 126-133. DOI 10.32014/2023.2518-170X.287.

8. Suchowerska Iwanec A.M., Carter J. P., Hambleton J. P. Geomechanics of subsidence above single and multi-seam coal mining. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. 8 (3): pp. 304–313. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.007.

9. Голубев Д.Д. Применение бесцеликовых технологий разработки месторождений полезных ископаемых на пологих и самовозгорающихся угольных пластах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. 7: 64–77. doi: https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-64-77.

10. Зубов В.П. Состояние и направления совершенствования систем разработки угольных пластов на перспективных угольных шахтах Кузбасса. // Записки Горного института Горный журнал. 225: (2017). No 92. https://doi.org/10.18454/pmi.2017.3.292.

11. Maleki H., Lawson H. Analysis of geomechanical factors affecting rock bursts in sedimentary rock formations. Procedia Engineering. (2017). 191: pp. 82–88. Available from: https://doi.org/10.1016/j. proeng.2017.05.157.

12. Muminov R.O., Ruzibaev A.N., Juraev N.N., Ravshanov J.R., Kuziev D.A. Development of measures to enhance the rotation and feed mechanism of a drill rig 2024 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • ugol'– russian Coal Journal, 2024, № 1, pp. 94-99 DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-1-94-99.

УДК: 622.235:622.271
DOI:10.54073/GV.2025.3.102.005

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЕМОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРА ПРИ ОСВОЕНИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЫСОТЫ ОТРАБАТЫВАЕМОГО УСТУПА



Жабборов О.И.,
ГИП по горным работам
ЦПБ АО «НГМК»

Тухташев А.Б.,
заведующий кафедрой
«Горное дело» НГГТУ,
д.т.н. профессор

Кенжаев Х.Т.,
заместитель начальника
ЦПБ АО «НГМК»

Miqyos jihatdan kichik bo'lgan oltin konlarini o'zlashtirishda turli balandlikdagi pog'onalarda qazish-yuklash uskunalarining texnik va hisobiy ish unumdorligini aniqlash, shuningdek, optimal qazish-yuklash uskunalari analogini tanlash bo'yicha tadqiqotlar o'tkazildi. Qazish-yuklash uskunalarining (QYU) unumdorligi o'zgarishi aniqlandi, shuningdek, qazib olish pog'ona balandligiga qarab QYU turlarini qo'llash bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqildi. Bu esa, o'z navbatida, mos sharoitlar uchun turli qazish-yuklash va transport uskunalari to'plamlaridan foydalanish zaruratini belgilaydi.

Kalit so'zlar: *pog'ona, pog'ona balandligi, QYU, unumdorlik, samaradorlik, texnika tanlash, kovsh, hajm, unumdorlikning kamayishi, taqqoslov tahlil, pog'ona parametrlari.*

Проведены исследования по определению технической и расчётной эксплуатационной производительности, а также рационального аналога выемочно-погрузочного оборудования в различной высоте отрабатываемого уступа при освоении мелкомасштабных золоторудных месторождений. Установлено изменение производительности выемочно-погрузочного оборудования (ВПО), а таже рекомендовано применение ввода ВПО в зависимости от высоты добычного уступа, что в свою очередь определяет необходимость применения различных комплектов выемочно-погрузочного и транспортного оборудования для соответствующих условий.

Ключевые слова: *уступ, высота уступа, ВПО, производительность, эффективность, подбор техники, ковш, объём, снижение производительности, сравнительный анализ, параметры уступа.*

Выемочно-погрузочные работы в карьерах заключаются в выемке из массива (развала или разрыхлённого слоя), перемещение и разгрузка горной массы в транспортные средства. Выемочно-погрузочные работы – один из основных технологических процессов на карьерах (удельный вес их в общих затратах на открытую разработку месторождений достигает 20-25 %).

Выемочно-погрузочные работы осуществляются в забоях, которыми в зависимости от типа машин служат горизонтальные поверхности разрабатываемого горизонта, торец заходки или откос уступа. Геометрические параметры забоев и заходок зависят от способа подготовки горной породы карьера, выемочно-погрузочных работ, их технологии, параметров и расположения в забое выемочно-погрузочного и транспортного оборудования с учётом обеспечения безопасных условий работы и максимально экономического эффекта. При освоении мелкомасштабных месторождений одним из определяющих факторов эффективности производства тоже является рациональный выбор рационального аналога выемочно-погрузочного оборудования.

В современных условиях, характеризующихся ростом затрат на приобретение оборудования, топливно-энергетические материалы, амортизацию и техническое обслуживание, а так же снижением мощности и качественных показателей рудных тел, становится особенно важным уделять внимание выбору аналога оборудования. Кроме того, необходимо стремиться к минимизации потерь и разубоживания руды и металла.

Основными показателями в данном случае являются:

– сравнительно высокая производительность оборудования по сравнению с другими аналогами;

– сравнительно низкие коэффициенты потерь и разубоживания руды и металла;

– оптимальные технико-экономические показатели;

– достижение максимального извлечения руды;

– обеспечение максимально возможных показателей эксплуатационной производительности оборудования;

– обеспечение безопасных условий эксплуатации.

В рассматриваемых условиях отработки мелкомасштабных золоторудных месторождений одним из способов достижение поставленных целей является подбор техники в соответствии с параметрами уступа, где даже незначительное несоответствие высоты уступа геометрии работы ковша может привести к потере до 10-20 % производительности [1].

Особенно важно учитывать это на мелкомасштабных месторождениях, где невозможно обеспечить стандартные параметры уступов 5-10 *м*. В таких случаях наиболее целесообразна работа на уступах высотой 2-5 *м*, где производительность напрямую зависит от коэффициента наполнения ковша, удобства подхода к забою и времени позиционирования машины.

В условиях ограниченного масштаба горных работ и нестабильных геометрических параметров забоя особое внимание уделяется соответствию рабочих характеристик машин параметрам уступов.

Таблица 1

Таблица расчёта производительности экскаватора

№ п/п	Наименование	Обозначение	Формула расчёта	Единица измерения
2.	Продолжительность одного цикла	$T_ц$		*сек*
3.	Теоретическая производительность экскаватора	$Q_{теор}$	$Q_{теор} = 3600 \cdot \frac{E_к}{T_ц}$	*м³/час*
4.	Коэффициент наполнения ковша	$K_н$		
5.	Коэффициент разрыхления пород в ковше	$K_{р(к)}$		
6.	Коэффициент экскавации	$K_э$	$K_э = \frac{K_н}{K_{р(к)}}$	
7.	Высота уступа	$H_у$		*м*
8.	Радиус черпания экскаватора	$R_ч$		*м*
9.	Время непрерывной работы экскаватора на одном месте	$t_р$	$t_р = \frac{V_{блж}}{Q_{теор}} = \frac{H_у \cdot 2\pi \cdot R_ч \cdot K_р \cdot \alpha_{пов}}{360 \cdot Q_{теор}}$	*час*
10.	Время передвижки экскаватора	$t_п$	10 мин	*час*
11.	Техническая производительность экскаватора	$Q_{тех}$	$Q_{тех} = \frac{Q_{теор} \cdot K_Э \cdot t_Р}{(t_Р + t_П)}$	*м³/час*
12.	Продолжительность смены	$T_{см}$		
13.	Коэффициент использования сменного времени экскаватора	$k_{ис}$	$K_{ис} = 0.8 \div 0.9$	*час*
14.	Эксплуатационная производительность экскаватора	$Q_э$	$Q_Э = Q_{тех} \cdot T_{СМ} \cdot K_{ИС}$	*м³/смену*
15.	Количество смен в году (с учетом 1 дня в неделе для проведения взрывных работ на карьере)	$N_{см}$		*смена*
16.	Годовая производительность экскаватора	$Q_{год}$	$Q_{год} = Q_э \cdot N_{см}$	*м³/год*

Наиболее широко применяемыми типами техники в таких условиях являются экскаваторы с прямой и обратной лопатой, а также фронтальные погрузчики.

Принципиальное различие в конструкции рабочего органа и способе взаимодействия с призмой обрушения определяет специфику их применения в зависимости от высоты уступа. Учитывая произведенную аналитическую работу, при разработке уступов высотой 2-2,5 *м* фронтальные погрузчики обеспечивают более высокую производительность по сравнению с экскаваторами аналогичного объёма ковша (5 и 6 *м³*). Это обусловлено рядом факторов:

– во-первых, ковш ФРП имеет большую ширину режущей кромки, что позволяет захватывать больше материала за один цикл;

– во-вторых, геометрия работы погрузчика способствует более полному наполнению ковша при заборе материала в горизонтальной плоскости.

На основе существующих материалов и внесённых дополнений к имеющимся методикам нами была использована нижеследующая последовательность определения производительности ВПО с учётом принимаемых условий отработки маломощных рудных тел.

Основными источниками являются «Справочник. Открытые горные работы» [2], «Нормы технологического проектирования горнорудных предприятий цветной металлургии с открытым способом разработки» ВНТП 35-86 [3] и «Единые отраслевые нормы выработки и времени на открытые горные работы» ЕНВВ [4], которые используется в настоящее время в горных проектных институтах и проектных бюро комбинатов.

При этом, для условий мелкомасштабных месторождений с относительно небольшой высотой добычного уступа, были включены дополнительные параметры, как: $t_{пост}$ – постоянная часть времени цикла, $t_р$ – дополнительное время на передвижку ФРП по забою и др. Это, в свою очередь, позволяет скорректировать теоретическую эксплуатационную производительность оборудования с учётом ранее проведённых хронометражных данных на производственных объектах НГМК.

В *табл. 1* приводится основа определения производительности экскаватора.

В *табл. 2* приводится основа определения производительности фронтального погрузчика.

Проставляя исходные параметры принимаемых условий эксплуатации ФРП и экскаваторов различных объёмов ковша, определяются эксплуатационные параметры производительности ВПО в различных условиях эксплуатации.

Принимаемые производительности ВПО являются расчётными, и в настоящей работе условия эксплуатации будут использованы в основном при разработке маломощных рудных тел мелкомасштабных месторождений. Выполнив расчёты по разработанному алгоритму, получаем соответствующие значения эксплуатационных параметров использования аналогов ВПО для условно принятых исходных данных, которые приведены в *табл. 3.*

Таким образом, коэффициент наполнения ковша у ФРП при условии производства выемочно-погрузочных работ на уступах высотой 2 *м* и 2,5 *м* превышает аналогичный показатель у экскаваторов.

Проведённые расчёты производительности оборудования подтверждают данную тенденцию:

– при высоте уступа 2 *м* фронтальный погрузчик с ковшом объёмом 6 *м³* обеспечивает годовую производительность 945 тыс. *м³*, в то время как экскаватор с таким же объёмом ковша – 827 тыс. *м³*.

Таблица 2

Таблица расчёта производительности фронтального погрузчика

№ п/п	Наименование	Обозначение	Формула расчёта	Единица измерения
2.	Продолжительность одного цикла ФРП	$T_ц$	$T_Ц = t_{пост} + 0.06 \cdot (\frac{L_{заг}}{V_{заг}} + \frac{L_{пор}}{V_{пор}})$	*мин*
3.	Расстояние транспортировки и возврата	$L_{заг}$, $L_{пор}$		*м*
4.	Скорость движения погрузчика с загруженным ковшом	$V_{заг}$		*км/час*
5.	Скорость движения погрузчика с порожным ковшом	$V_{пор}$		*км/час*
6.	Постоянная часть времени цикла	$t_{пост}$		*мин*
7.	Коэффициент наполнения ковша	*Кн*		
8.	Коэффициент использования сменного времени ФРП	$K_в$		
9.	Теоретическая производительность ФРП	$П_т$	$Q_{теор} = \frac{60 \cdot V}{T_Ц}$	*м³/час*
10.	Коэффициент наполнения ковша	$K_н$		
11.	Коэффициент разрыхления пород в ковше	$K_{р(к)}$		
12.	Коэффициент экскавации	$K_э$	$K_э = \frac{K_н}{K_{р(К)}}$	
13.	Высота уступа	$H_у$		*м*
14.	Длина ФРП	*9,4*		*м*
15.	Дополнительное время на передвижку ФРП по забою	$t_р$	$t_р = \frac{V_{бюк}}{Q_{теор}} = \frac{H_у \cdot 2\pi \cdot R_ч \cdot K_р \cdot \alpha_{пов}}{360 \cdot Q_{теор}}$	*сек*
16.	Техническая производительность ФРП	$Q_{тех}$	$Q_{тех} = \frac{П_т \cdot K_э \cdot t_р}{t_р}$	*м³/час*
17.	Продолжительность смены	$T_{см}$		*мин*
18.	Коэффициент использования сменного времени ФРП	$k_{ис}$	$K_{ис} = 0.8 \div 0.9$	
19.	Эксплуатационная производительность ФРП	$Q_э$	$Q_э = Q_{тех} \cdot T_{см} \cdot K_{ис}$	*м³/смену*
20.	Количество смен в году (с учётом 1 дня в неделе для проведения взрывных работ на карьере)	$N_{см}$		*смена*
21.	Годовая производительность ФРП	$Q_{год}$	$Q_{год} = Q_э \cdot N_{см}$	*м³/год*

Таблица 3

Эксплуатационные параметры использования аналогов ВПО для условно принятых исходных параметров

№ п/п	Годовая производительность	Высота уступа, *м*									
		2	**2,5**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1.	ЭГ с *Vк* = 6 *м³*, тыс. *м³/год*	827	951	1 057	1 300	1 439	1 550	1 640	1 715	1 778	1 832
2.	ФРП с *Vк* = 6 *м³*, тыс. *м³/год*	945	992	1 031	1 093	1 143	1 183	1 218	1 249	1 275	1 299
3.	ЭГ с *Vк* = 5 *м³*, тыс. *м³/год*	712	806	883	1 063	1 158	1 231	1 289	1 337	1 376	1 409
4.	ФРП с *Vк* = 5 *м³*, тыс. *м³/год*	787	826	859	911	952	986	1 015	1 040	1 063	1 083

Аналогичное преимущество сохраняется и при ковше 5 *м³* – 787 тыс. *м³* у ФРП против 712 тыс. *м³* у экскаватора;

– при высоте уступа 2,5 *м* фронтальный погрузчик с ковшом объёмом 6 *м³* обеспечивает годовую производительность 992 тыс. *м³*, в то время как экскаватор с таким же объёмом ковша – 951 тыс. *м³*. Аналогичное преимущество сохраняется и при ковше 5 *м³* – 826 тыс. *м³* у ФРП против 806 тыс. *м³* у экскаватора.

Однако с увеличением высоты уступа более 3 *м* наблюдается рост эффективности экскаваторов, что объясняется возможностью работы в вертикальной плоскости и меньшей зависимостью от пространственной конфигурации забоя. При высоте уступа 10 *м* экскаватор с ковшом 6 *м³* достигает годовой производительности 1 832 тыс. *м³*, в то время как аналогичный показатель у ФРП составляет лишь 1 299 тыс. *м³*. Результаты расчётов определения эксплуатационной производительности экскаваторов и ФРП приведены на *рис. 1*.

Аналитически установлена зависимость производительности оборудования от высоты уступа, где фронтальные погрузчики являются оптимальным выбором при низких уступах, а экскаваторы демонстрируют наилучшую эффективность при более высоких уступах.

Эти результаты представляют собой значимую основу для технико-экономического обоснования проектных решений в горнодобывающей отрасли и могут быть использованы при выборе ВПО на стадии проектирования и эксплуатации карьеров с малой мощностью разрабатываемых блоков.

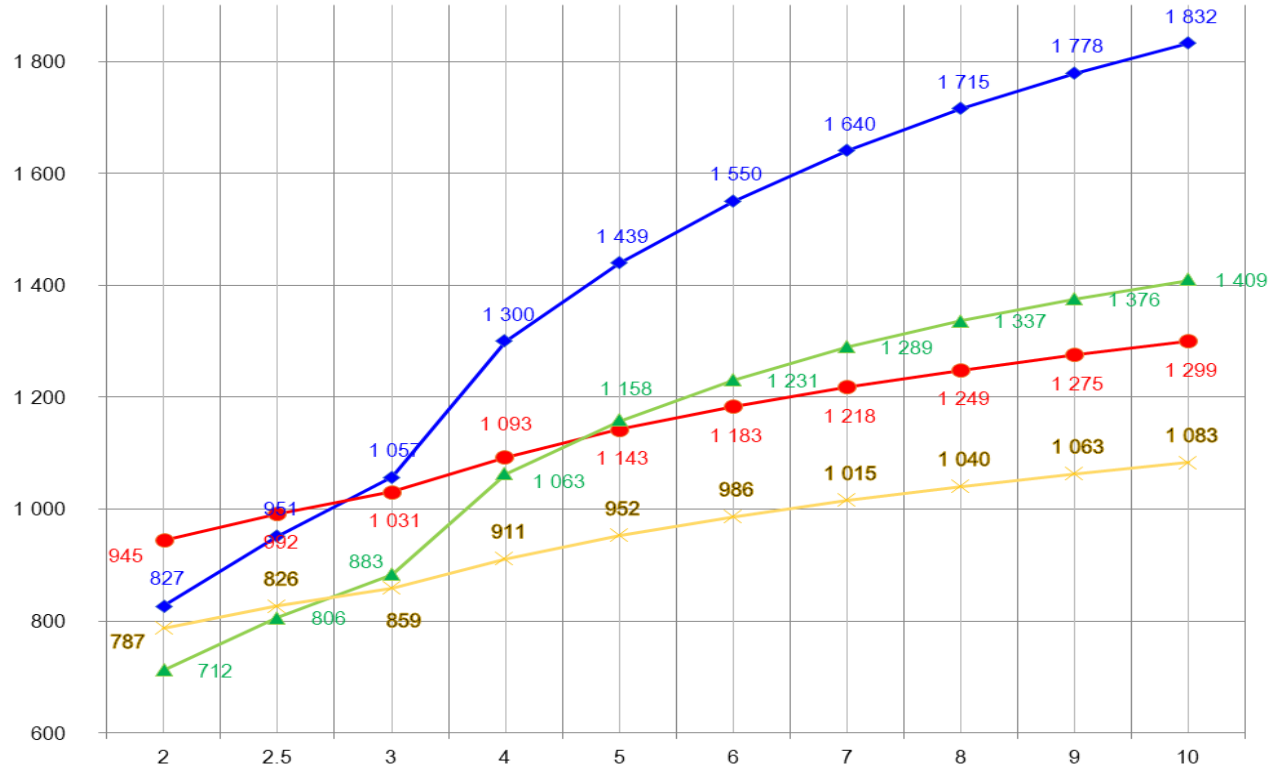


Рис. 1. Зависимость изменения расчётной производительности ВПО в различных условиях отработки мелкомасштабных золоторудных месторождений: – годовая производительность ЭГ с $V_к$ = 6 *м*³, тыс. *м³/год*; – годовая производительность ФРП с $V_к$ = 6 *м*³, тыс. *м³/год*; – годовая производительность ЭГ с $V_к$ = 5 *м*³, тыс. *м³/год*; – годовая производительность ФРП с $V_к$ = 5 *м*³, тыс. *м³/год*

1. Выбор рационального аналога ВПО при изменении высоты отрабатываемых добычных уступов для отработки мелкомасштабных золоторудных месторождений имеет актуальную научную и практичную значимость и требует дальнейшего детального изучения.

2. Для снижения показателей потерь производительности ВПО на стадиях предпроектных и проектных работ для каждого отрабатываемого мелкомасштабного месторождения необходимо выбирать оптимальную высоту добычного уступа в зависимости от мощности рудного тела и содержания металла в руде, а также рассматривать варианты селективной выемки рудных тел малой мощности с внесением соответствующих изменений в высоту уступа [5].

3. Выемочно-погрузочное оборудование необходимо выбирать в зависимости от высоты уступа, соответственно элементы и параметры системы разработки должны быть определены в зависимости от параметров горнотранспортного оборудования.

4. Как показывают предварительные исследования по использованию различных аналогов ВПО для разработки рудных тел малой мощности, высота добычного уступа должна быть уменьшена до соответствующего предела. В связи с этим предлагается использовать следующие варианты техники:

– при высоте уступа до 3 *м* – фронтальные погрузчики;

– при высоте уступа более 3 *м* – экскаваторы.

5. Уточнённый типаж можно определить в соответствии с существующими методиками проведения хронометража на производственном объекте совместно с эксплуатирующей организацией.

6. Поскольку объёмы рудных тел в общем объёме горной массы при обычных условиях составляют от 5 до 10 %, максимальные потери производительности ВПО при отработке маломощных рудных тел со снижением высоты уступа будут незначительными.

Библиографический список:

1. Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В. Проектирование карьеров. Том 1. – М.: Издательство академии горных наук, 2001. – С. 494-500.

2. Справочник. Открытые горные работы. – М.: Горное бюро, 1994. – С. 232-335.

3. Нормы технологического проектирования горнорудных предприятий цветной металлургии с открытым способом разработки» ВНТП 35-86 – М: Минцветмет, 1986. – С. 15-20.

4. Единые отраслевые нормы выработки и времени на открытые горные работы – ЕНВВ. М: Минцветмет, 1990. – С. 20.

5. Тухташев А.Б., Жабборов О.И. Методика определения показателей потерь и разубоживания для условий мелкомасштабных золоторудных месторождений. Навои, 2020. – С. 2-22.

УДК 622.272:622.7

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.006

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПОТЕРЬ И РАЗУБОЖИВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ

Косимов М.О.,
доцент кафедры
«Горное дело» АФ НИТУ «МИСИС»,
к.э.н.

Раимжанов Б.Р.,
профессор кафедры
«Горное дело» АФ НИТУ «МИСИС»
д.т.н.

Кобилов Ш.Б.,
и. о. доцента кафедры
«Горное дело» АФ НИТУ «МИСИС»,
PhD

Oltin tarkibli ruda konlarini yer osti usulida qazib olishda yo'qotilishlar va sifatsizlanishlar ko'rsatgichlariga ta'sir etuvchi asosiy omillar ko'rib chiqildi. Ular qatoriga ruda tanasining yotish burchagi, tektonik buzilishlar, ruda tanasining chuqurligi, ruda tanasining shakli va o'lchamlari, joylashgan jinslarning barqarorligi, ochish usuli, qabul qilingan qazib olish texnologiyasi hamda xodimlarninig malakasi kiradi. Amaliy tajriba shundan dalolat beradiki, yer osti usulida oltin tarkibli ruda konlarini qazib olishda yo'qotilish va sifatsizlanishning yuqori darajada bo'lishining asosiy sabablari – kon ishlarini olib borishning aniqligi past bo'lishi, burg'ilash va portlatish ishlarining sifati ustidan samarali nazorat tizimining mavjud emasligi, eskirgan mustahkamlash va shamollatish sxemalaridan foydalanish va zamonaviy geoaxborot tizimlari va 3D modellash imkoniyatlaridan yetarlicha foydalanmaslikdir. Shularni hisobga olgan holda va ilg'or kompaniyalarning ijobiy tajribasi asosida oltin tarkibli ruda konlarin yer osti usulida qazib olishda yer osti boyliklaridan oqilina foydalanishning istiqbolli yo'nalishlari aniqlandi.

Kalit so'zlar: *ruda tanasi, shakllari, konturlari, yo'qotilish va sifatsizlanish miqdori, omillar, ruda tanasining qalinligi, yotish burchagi, tektonik buzilishlar, yotqiziqlar chuqurligi, barqarorlik, xodimlar malakasi, raqamlashtirish.*

Рассмотрены основные факторы, влияющие на показатели потерь и разубоживания при разработке месторождений золотосодержащих руд подземным способом такие как влияние угла падения рудного тела, тектонической нарушенности, глубины залегания, формы и размеров рудного тела, устойчивости вмещающих пород, способа вскрытия, принятой технологической схемы выемочных работ, а также влияния квалификации персонала. Практика показывает, что основными причинами высокого уровня показателей потерь и разубоживания является – низкая точность ведения горных работ, неэффективная система контроля качества буровзрывных работ, устаревшие схемы крепления и проветривания, слабое использование современных ГИС и 3D-моделирования. Исходя из этого и на основе положительного опыта горнодобывающих компаний, определены перспективные направления рационального использования недр при подземной разработке месторождений золотосодержащих руд.

Ключевые слова: *рудное тело, формы, контуры, величины потерь и разубоживания, факторы, влияние, мощность рудного тела, уголь падения, тектоническая нарущенность, глубина залегания, устойчивость, квалификация персонала, цифровизация.*

Разработка золотосодержащих руд подземным способом представляет собой сложный технологический процесс, эффективность которого напрямую влияет на экономические показатели горнодобывающего предприятия. Одними из ключевых параметров, определяющих рентабельность добычи, являются потери полезного ископаемого и степень разубоживания руды. Потери руды ведут к недополучению ценных компонентов, в то время как разубоживание – к снижению качества добываемого сырья, что увеличивает затраты на переработку и снижает выход готового продукта [1].

Влияние на эти показатели оказывают множество факторов, включая геологическое строение месторождения, способ подготовки рудничного поля и системы разработки, техническое состояние оборудования, квалификацию персонала, а также организацию горных работ. Кроме того, особую роль играют точность геологической разведки, соблюдение проектных параметров и эффективность систем контроля качества.

Влияние угла падения рудного тела на показатели потерь и разубоживания руды.

Угол падения рудного тела оказывает существенное влияние на выбор технологии добычи, а также на уровень потерь и разубоживания. При малых углах падения (<10°) сложнее обеспечить самотёк руды, но проще контролировать контур выемки. При увеличении угла падения (>50°) возрастает вероятность завалов, смещения руды и неуправляемого обрушения, что приводит к высоким потерям и разубоживанию (*рис. 1*).

Влияние угла падения рудного тела на показатели потерь и разубоживания является важным аспектом так как, при увеличении угла падения рудного тела возрастают эти показатели. В круто наклонных рудных телах требуется контроль устойчивости и методы направленного и точного бурения и обрушения. Самый оптимальный диапазон углов падения для управляемой выемки варьируется в пределах 10-30°.

Влияние тектонической нарушенности рудного тела на показатели потерь и разубоживания руды.

Тектоническая нарушенность рудных тел – это степень их дислокации, трещиноватости и смещений, возникших в результате

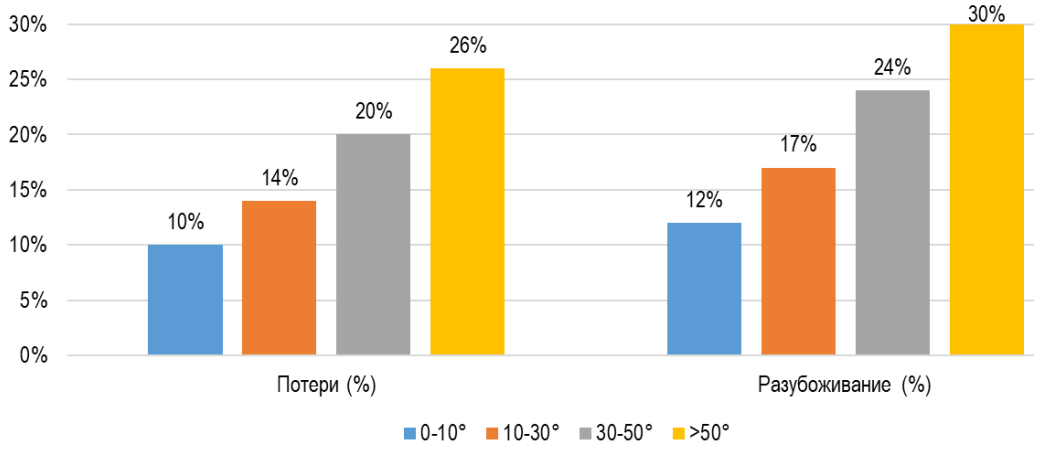


Рис. 1. Влияние угла падения рудного тела на потери и разубоживание

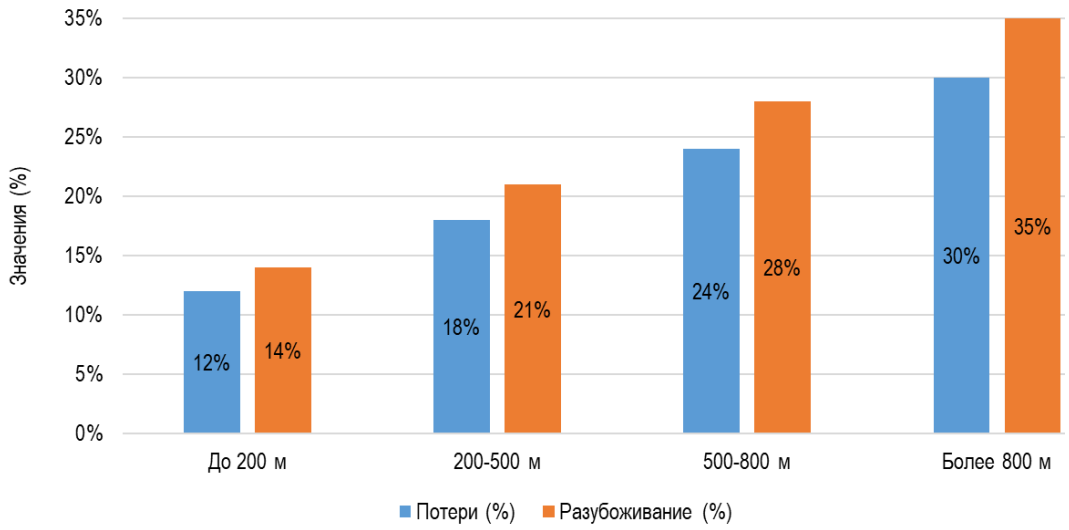


Рис. 2. Влияние глубины залегания на потери и разубоживание

Таблица 1

Характеристика потерь и разубоживания при различной степени нарушенности

Степень нарушенности	Потери (%)	Разубоживание (%)	Описание
Слабая	10	12	чёткие границы рудных тел, устойчивые выработки
Средняя	16	19	местные смещения, осторожный выбор технологии
Сильная	23	27	высокий риск нестабильности и обрушений
Крайняя	32	36	необходимость предварительного укрепления, нестабильные зоны

геологических процессов. Она существенно влияет на устойчивость выработок, точность буровзрывных работ, а также на выбор способа и схемы отработки. С увеличением нарушенности возрастают потери и разубоживание, поскольку становится сложнее контролировать контуры выемки и избежать захвата пустых пород (*табл. 1*).

Таким образом, повышенная тектоническая нарушенность массивов горных пород приводит к росту потерь и разубоживания руды при добыче. Когда в массиве сильная нарушенность требуется применение дополнительных мер по стабилизации массива (крепление горных выработок). В таких массивах, с высокой тектонической активностью, выбор и применяемая технология по ведению горных работ должен учитывать геомеханические параметры всего массива.

Влияние глубины залегания рудного тела на показатели потерь и разубоживания руды. Глубина залегания рудных тел оказывает прямое влияние на параметры потерь и разубоживания при их подземной добыче. С увеличением глубины возрастают геомеханические нагрузки, давление на вмещающие породы и устойчивость горных выработок снижается. Это приводит к необходимости усложнения систем разработки и применению более дорогих технологий, что повышает риски увеличения потерь и разубоживания (*рис. 2*).

Анализ показывает, чем глубже залегает рудное тело, тем выше значения потерь и разубоживания. Основными причинами роста показателей потерь и разубоживания руды являются напряжённо-деформированное состояние массива, давление на пройденных горных выработок и снижение устойчивости массива.

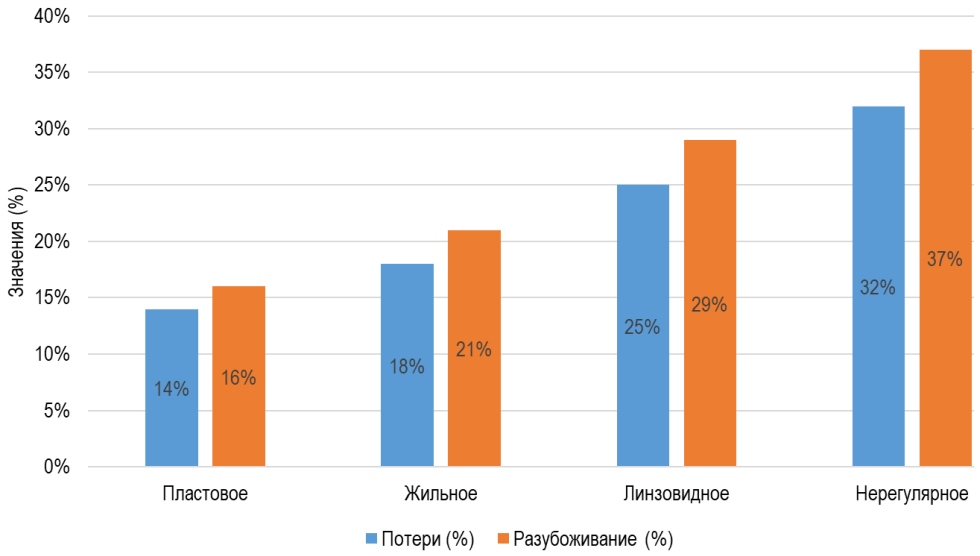


Рис. 3. Зависимость потерь и разубоживания от формы рудного тела

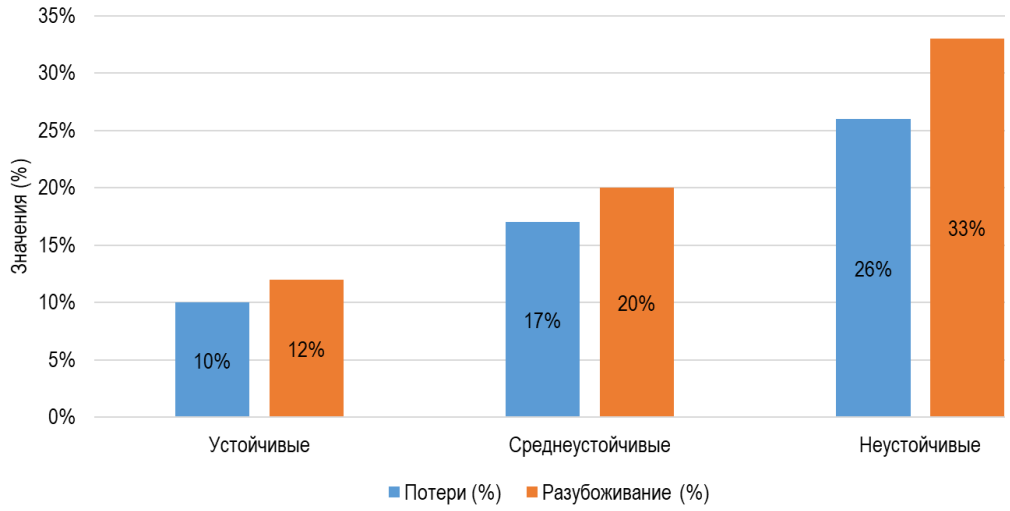


Рис. 3. Зависимость потерь и разубоживания от формы рудного тела

Таблица 2

Потери и разубоживание в зависимости от способа вскрытия

Способ вскрытия	Потери (%)	Разубоживание (%)	Описание
Вертикальные стволы	16	18	надёжны, но ограничены по гибкости доступа
Наклонные выработки (НТС)	20	25	увеличенные расстояния транспортировки
Комбинированный	13	15	гибкий доступ, оптимизация маршрутов и контроля

При глубоком залегании требуется дополнительно проведение предварительного геомеханического моделирования массива горных пород.

Влияние формы и размеров рудного тела на показатели потерь и разубоживания руды.

Форма и размеры рудных тел играют ключевую роль в определении параметров систем разработки *(рис. 3)*. Пластовые и жильно-протяжённые тела легче поддаются планированию и механизированной отработке, в то время как линзовидные и нерегулярные тела, характеризующиеся сложной геометрией и резким изменением мощности, приводят к значительным потерям и разубоживанию из-за невозможности точного контроля границ [2-6].

Таким образом, зависимость потерь и разубоживания от формы рудного тела показывает, что потери и разубоживание возрастают при увеличении сложности геометрии рудных тел [7-9]. Наиболее лучшими в плане потерь являются пластовые и жилы, тогда как линзовидные и нерегулярные формы требуют детального моделирования. Современные ГИС и геомодельные системы позволяют повысить точность при отработке сложных рудных тел.

Влияние устойчивости вмещающих пород на показатели потерь и разубоживания руды.

Устойчивость вмещающих пород оказывает значительное влияние на выбор системы разработки и параметры отработки рудных залежей. При наличии устойчивых пород создаются благо-

Таблица 2

Потери и разубоживание в зависимости от способа вскрытия

Способ вскрытия	Потери (%)	Разубоживание (%)	Описание
Вертикальные стволы	16	18	Надёжны, но ограничены по гибкости доступа
Наклонные выработки (НТС)	20	25	Увеличенные расстояния транспортировки
Комбинированный	13	15	Гибкий доступ, оптимизация маршрутов и контроля

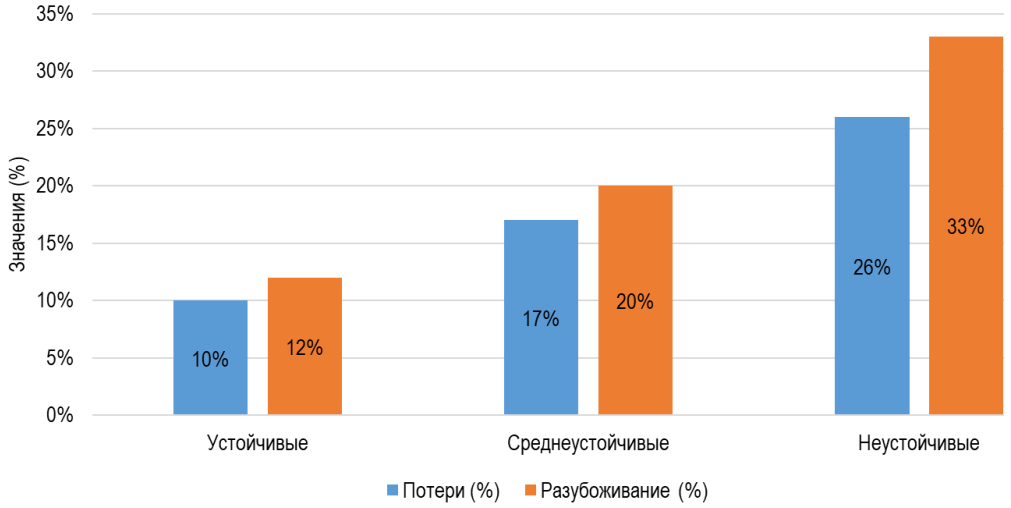


Рис. 3. Зависимость потерь и разубоживания от формы рудного тела

приятные условия для проведения горных работ с минимальными потерями и разубоживанием. В то же время слабоустойчивые и неустойчивые породы требуют дополнительных мер поддержки и контроля, что усложняет процессы очистных работ и увеличивает объёмы вовлекаемой пустой породы (*рис. 4*).

Анализ устойчивости вмещающих пород показывает, что повышенная устойчивость вмещающих пород снижает как потери, так и разубоживание руды. При работе в неустойчивых условиях требуются усиленные меры по креплению и геомеханическому мониторингу. Для прогнозирования потерь важно учитывать тектоническую нарушенность и сейсмическую активность района ведения горных работ.

Влияние способа вскрытия и подготовки на показатели потерь и разубоживания руды.

Выбор способа вскрытия и подготовки месторождения оказывает значительное влияние на величину потерь и степень разубоживания рудных масс (*табл. 2*). Различные способы вскрытия (вертикальные стволы, наклонные выработки, комбинированные способы) обеспечивают различный уровень доступа к рудным телам, что напрямую влияет на точность ведения очистных работ, эффективность логистики и безопасность [10-12].

Анализ способов вскрытия показывает, что наименьшие потери и разубоживание достигаются при использовании комбинированных способов вскрытия.

Наклонные горные выработки повышают сложность транспортных операций, что увеличивает показатели потерь. Предварительное моделирование и оптимизация способа вскрытия месторождения позволяют повысить экономическую эффективность горнодобывающего предприятия [13-18].

Влияние технологической схемы очистных работ на показатели потерь и разубоживания руды.

Технологическая схема очистных работ определяет последовательность, способ и порядок извлечения рудной массы, что напрямую влияет на величину потерь и степень разубоживания. Основные применяемые схемы включают сплошную, выемку с оставлением целиков, а также выемку руды с последующей закладкой выработанного пространства (*табл. 3*).

Таким образом, технологические схемы очистных работ показывают, что наименьшие потери и разубоживание достигаются при использовании схем с твердеющей закладкой выработанного пространства. Сплошная выемка руды сопряжена с высокими потерями, особенно в условиях неустойчивых пород. Выбор технологической схемы должен учитывать геометрию залежи, устойчивость горных пород и требования по охране окружающей среды.

Влияние квалификации персонала на показатели потерь и разубоживания руды.

Квалификация персонала - один из ключевых факторов, определяющих эффективность горных работ. Ошибки при проведении буровзрывных работ, отклонения от проектной схемы, недостаточный контроль качества бурения, а также недостаточная осведомленность в вопросах геометрии очистного пространства и поведения рудных тел ведут к увеличению как потерь, так и разубоживания (*рис. 5*).

Анализ уровня квалификации персонала показывает, что квалификация персонала оказывает прямое влияние на качество выполнения горных работ. Повышение уровня подготовки персонала снижает потери руды и степень разубоживания. Для стабильной работы горнодобывающего предприятия необходима систематическая работа по обучению, тренингам и контролю квалификационного уровня персонала.

В странах с высоким уровнем технологической зрелости горнодобывающей отрасли, таких как Канада, Австралия, Швеция и Чили, вопросам управления потерями и разубоживанием уделяется приоритетное внимание. Там реализованы следующие системные подходы:

Цифровизация геолого-технологических моделей: создание детализированных 3D-моделей месторождений позволяет более точно планировать отработку запасов полезных ископаемых и определять участки с высоким риском потерь;

Интеграция информационных систем: программные платформы (например, Deswik, Datamine, MinePlan) связывают геологию, планирование и контроль качества добычи полезных ископаемых.

Выводы:

1. Геологические факторы, такие как форма, мощность, углы падения и тектоническая нарушенность рудных тел, оказывают первостепенное влияние на потери и разубоживание. Наиболее сложные для отработки – мощные, непостоянные по форме и залегающие под большими углами падения рудные тела.

2. Горнотехнические параметры, включая точность бурения, параметры взрывных работ и расположение выработок, существенно влияют на эффективность очистных работ. Неточные работы приводят к перерасходу материалов, увеличению объёмов пустой породы и росту потерь.

3. Система разработки должна подбираться с учетом геомеханических условий месторождения. Системы разработки с закладкой показывают наименьшие потери, но требуют больших затрат.

4. Квалификация персонала играет ключевую роль в качестве выполнения технологических операций.

Повышение уровня подготовки и внедрение системы постоянного обучения персонала приводит к снижению потерь более чем в 2 раза по сравнению с низким уровнем квалификации.

5. Информационные и цифровые технологии, такие как геоинформационные системы, лазерное сканирование, моделирование и автоматизированное проектирование, позволяют точно прогнозировать зоны потерь и принимать превентивные меры.

6. Мероприятия по снижению потерь должны быть комплексными и учитывать все факторы от выбора системы разработки до человеческого фактора.

7. Зарубежный опыт показывает, что технологическая модернизация существенно снижает потери и разубоживание, цифровизация, автоматизация и предиктивная аналитика являются основными направлениями.

Библиографический список:

1. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. Учебник для вузов.4-издание, перераб. и доп. – М: Недра 1984. – 359 с.

2. Имашев А.Ж., Суимбаева А.М., Мусин А.А. Прогнозная оценка разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей системой подэтажных штреков // Записки Горного института. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2024. – Т. 266. – С. 283-294.

3. Korigov S., Adoko A.C., Sengani F. Unplanned Dilution Prediction in Open Stope Mining: Developing New Design Charts Using Artificial Neural Network Classifier // Journal of Sustainable Mining. 2022. Vol. 21. Iss. 2, pp.157-168.

4. Masoumi I., Kamali Gh.R., Asghari O. Assessment of an ore body internal dilution based on multivariate geostatistical simulation using exploratory drill hole data // Journal of Mining and Environment. 2019. Vol. 10. Iss. 1, pp. 271-286.

5. Villaescusa E. Geotechnical Design for Sublevel Open Stoping. Boca Raton: CRC Press, 2014. – 541 p.

6. Papaioanou A., Suorineni F.T. Development of a generalised dilution-based stability graph for open stope design // Transations of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology. 2016. Vol. 125. Iss. 2, pp. 121-128.

7. Фомин С.И., Кава П.Б., Маринин М.А. Анализ горно-геологических условий: карьера и формирование выемочной единицы при определении нормативных потерь и разубоживания руды // Записки Горного института. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2014. – Т. 207. – С. 74-77.

8. Лизункин В.М., Лизункин М.В., Рабольт А.Н., Гуров С.Г. Результаты опытно-промышленных испытаний технологии отработки маломощных пологопадающих пластообразных рудных залежей расширенными заходками // Горный журнал, 2019. – № 1. – С. 37-40.

9. Савич И.Н. Проблемы применения систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва: Горная книга, 2014. – № 1. – С. 366-373.

10. Ткач С.М., Батугин С.А., Баракаева И.Д. Объективная оценка разубоживания руд – перспективный путь повышения ресурсного потенциала недр // Горный журнал. – Москва: Издательский дом «Руда и металлы», 2016. – № 1. – С. 37-40.

11. Батугин С.А., Ткач С.М., Баракаева И.Д. Развитие методологических основ определения и учета разубоживания руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва: Горная книга, 2012. – № 9. – С. 312-319.

12. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2021. – 340 с.

13. Павлов А.М., Васильев Д.С. Совершенствование технологии подземной разработки тонких крутопадающих тел золоторудного месторождения Коневинского // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых, 2017. – Т. 40. – № 2. – С. 88-94.

14. Jang H., Topal E., Kawamura Y. Unplanned dilution and ore loss prediction in longhole stoping mines via multiple regression and artificial neural network analyses // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. № 5, pp. 449-456.

15. Cordova D.P., Zingano A.C., Gonçalves Í.G. Unplanned dilution back analysis in an underground mine using numerical models // REM – International Engineering Journal. 2022. Vol. 75. Iss. 4, pp. 379-388.

16. Câmara T.R., Leal R.S., Peroni R.L. Accounting for operational dilution by incorporating geological uncertainties in shortterm mine planning // DYNA. 2020. Vol. 87. № 213, pp. 178-183.

17. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Тимохин А.В., Яковлев А.М. Совершенствование методов учета повышенных потерь и разубоживания полезного ископаемого при добыче // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва, 2020. – № 3-1. – С.453-464.

18. Agnico Eagle Mines Ltd. LaRonde Complex Technical Report. – Canada: Agnico Eagle, 2022. – 156 p.

УДК 622.276:553.6:620.1:504
DOI:10.54073/GV.2025.3.102.007

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ ВОДООТЛИВА НА УЧАСТКЕ «ЗАПАДНЫЙ» КАРАХТАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ




Косимов М.О.,
доцент кафедры
«Горное дело» АФ НИТУ
«МИСИС», к.э.н.

Кобилов Ш.Б.,
и. о. доцента кафедры
«Горное дело» АФ НИТУ
«МИСИС», PhD

Мирзалиев Н.Н.,
инженер-проектировщик
ООО «O'zGEORANGMETLITI»

Мирзалиева М.М.,
инженер по НИР
АФ НИТУ «МИСИС»

«Zapadniy» Qaraxtay konining gidrogeologik sharoitlari bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar davomida ishlab chiqarish jarayonlarining barqarorligiga ta'sir ko'rsatadigan asosiy omillar aniqlandi. Asosiy muammo – tog' jinslarining suv bilan to'yinganligi bo'lib, bu ularning mustahkamlik xossalarining pasayishiga, infratuzilmalarning shikastlanishiga olib keladigan ko'chki xavflarining ortishiga sabab bo'lmoqda. Suv oqimlarining salbiy ta'sirini kamaytirish maqsadida quyidagi yechimlar taklif etildi: zumpflarni loyihalash va qurish, yuqori samarali nasos uskunalaridan foydalanish, shuningdek, yer usti va yer osti suv oqimlarini boshqarish bo'yicha choralarni joriy etish.

Kalit so'zlar: *suv bilan to'lish, suv kirishi, gidrogeologiya, nasos uskunalari, suv chiqarish, zumpf, yotqiziqlar barqarorligi, bosim, drenaj, ekologik xavfsizlik.*

В ходе проведённого исследования гидрогеологических условий карьера «Западный» Карахтайского месторождения установлены ключевые факторы, влияющие на устойчивость производственных процессов. Основной проблемой является обводнение пород, вызывающее снижение их прочностных характеристик, увеличение рисков оползней с повреждением инфраструктуры. Для минимизации негативного влияния водопритоков предложены решения, включающие проектирование и строительство зумпфов, использование высокоэффективного насосного оборудования, а также внедрение мер по управлению поверхностным и подземным стоком.

Ключевые слова: *обводнение, водопритоки, гидрогеология, насосное оборудование, водоотлив, зумпф, устойчивость откосов, напор, дренаж, экологическая безопасность.*

На карьере «Западный» Карахтайского месторождения существует значимая гидрогеологическая проблема, влияющая на производственные процессы.

По различным горно-геологическим условиям и обстоятельствам в центральной части карьера сформировался бассейн объёмом около 3000 *м³*, который в данное время препятствует эффективной разработке месторождения (*рис. 1*) [1, 2].

Для удаления воды из карьера функционируют два насоса Tsurumi KTZ415-51, предназначенные для откачки воды. Один насос установлен в центральной части карьера на абсолютной отметке +696, а второй – в его южной части на отметке +692.

Один из них откачивает воду для нужд хозяйственного обеспечения населения, направляя её в соответствующие системы водоснабжения. Другой насос используется для обеспечения водоснабжения производственного процесса, в частности, для промывки щебня, необходимого для дальнейшего использования на производственных мощностях, расположенных в административно-бытовом комплексе (АБК) карьера [3].

Работа насосных систем организована с целью оптимизации водоснабжения, поддержания необходимых условий на объекте и обеспечения бесперебойной работы как для нужд населения, так и для производственного процесса, что способствует эффективной эксплуатации карьера.

А в южной части карьера установлен насос модели TSURUMI KTZ 415-51 с производительностью 120 *м³/ч* (*рис. 1*). Однако, учитывая, что АБК расположен на отметке +752, напор данного насоса оказался недостаточным для своевременного заполнения бака (специальная ёмкость с объёмом 50 *м³* предназначенная для использования производственных нужд). Полное заполнение требовало определенного времени и это обстоятельство приводило к ожиданию, к простоям и частичной остановке работы [4, 5].

Техническая характеристика насоса марки «Tsurumi KTZ415-51» приведена в *табл. 1*.

В то же время, несмотря на круглосуточную работу, из-за разности притока воды и производительности насоса в западной части карьера продолжала накапливаться вода. Такая ситуация свидетельствует о необходимости повышения эффективности работы систем водоснабжения, предотвращения дальнейших задержек и обеспечения стабильности производственного процесса. Наличие воды на карьере приводит к потерям устойчивости бортов,

Рис. 1. Образования воды в центральной части карьера Западный», июль 06.2024 г.

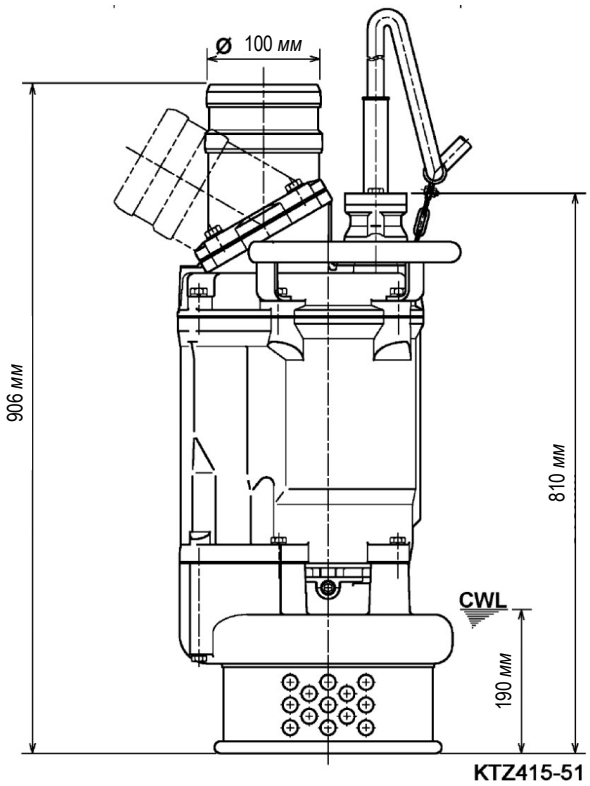


Рис. 2. **Чертёж насоса марки «Tsurumi KTZ415-51»**

Таблица 1

Ожидаемые притоки воды

Наименование	Участок «Западный»
Нормальный приток, *м³/ч*	130
Максимальный приток, *м³/ч*	150

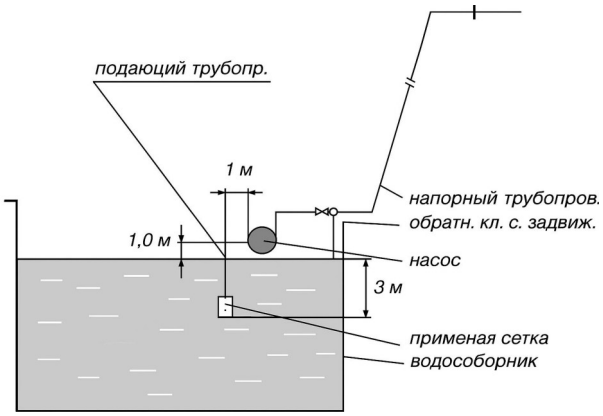


Рис. 3. Схема подводящего и напорного трубопроводов

простоям в работе, отрицательно влияет на ведение буровзрывных работ (БВР), снижает качество добываемого полезного ископаемого.

Расчёт водопритоков в карьер «Западный» производится на основе анализа источников обводнённости существующего карьера, общих гидрогеологических и климатических условий. Суммарный водоприток в карьер представляет собой величину, характеризующуюся водопритоком за счёт атмосферных осадков (Q_A), поверхностного стока Кушбулаксая ($Q_{пов}$), а также из отложений эоцена (P_2) и миоцена (N_1). Таким образом [6]:

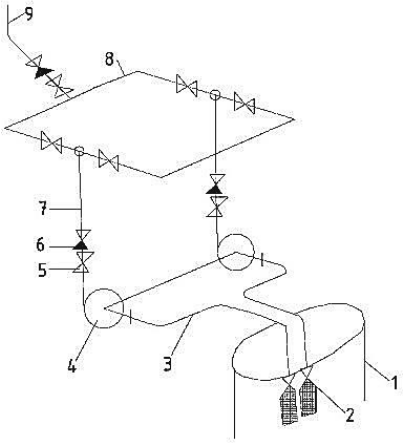


Рис. 4. Коммутационная схема главной водоотливной установки: *1 – приемный колодец; 2 – водозаборное устройство с приемной сеткой; 3 – всасывающий трубопровод; 4 – насосные агрегаты; 5 – задвижки; 6 – обратные клапаны; 7 – стояк; 8 – кольцевой коллектор; 9 – нагнетательный трубопровод*

Таблица 2

Расчёт водоотливной установки, откачиваемую в бак на АБК

Требуемая расчетная подача насоса, *м³/час*		54
Ориентировочный геометрический напор, *м*		20,9
Необходимое число последовательно соединенных колес насоса		1
Расчетное давление воды в нагнетательном трубном ставе, *МПа*		0,804
Труба	для нагнетания	121·7·8000
	для всасывания	146·7·8000
Скорость воды в подводящем трубопроводе, *м/с*	нагнетательный	1,54
	всасывающий	1,01
Коэффициенты линейных гидравлических сопротивлений	нагнетательного трубопровода	0,0410
	всасывающего трубопровода	0,0382
Сумма коэффициентов местных гидравлических сопротивлений	нагнетательного трубопровода	17,5
	всасывающего трубопровода	8,8
Обобщенный коэффициент сопротивления внешней сети		$12{,}146 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3

Напорная характеристика внешней сети (%)

%	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %	125 %
Q, *м³/ч*	0	12,5	25	37,5	50	62,5
H_c, *т*	19	19,18	19,75	20,7	22,03	23,74

$$Q = Q_A \cdot Q_{ПОВ} \cdot Q_{P_2} \cdot Q_{N1} \quad (1)$$

Суммарный водоприток в карьер «Западный» за счет атмосферных осадков и подземных вод на данный момент составляет [7]:

$$Q_1 = 6{,}6л/с + 6{,}12л/с = 12{,}72л/с = 82{,}422\ м^3/ч \quad (2)$$

$$Q_2 = 17{,}2\ л/с + 6{,}12\ л/с = 23{,}32\ л/с = 151{,}11\ м^3/ч \quad (3)$$

$$Q_3 = 3{,}6\ л/с + 6{,}12\ л/с = 9{,}72\ л/с = 62{,}982\ м^3/ч \quad (4)$$

$$Q_4 = 4{,}7\ л/с + 6{,}12\ л/с = 10{,}82\ л/с = 70{,}11\ м^3/ч \quad (5)$$

Расчёт проектирования зумпфа в действующем карьере «Западный»:

– объём зумпфа определяется с учётом водопритока за 6 *ч;*

– максимальный водоприток составляет 150 *м³/ч*;

– за 6 *ч* объём воды составит:

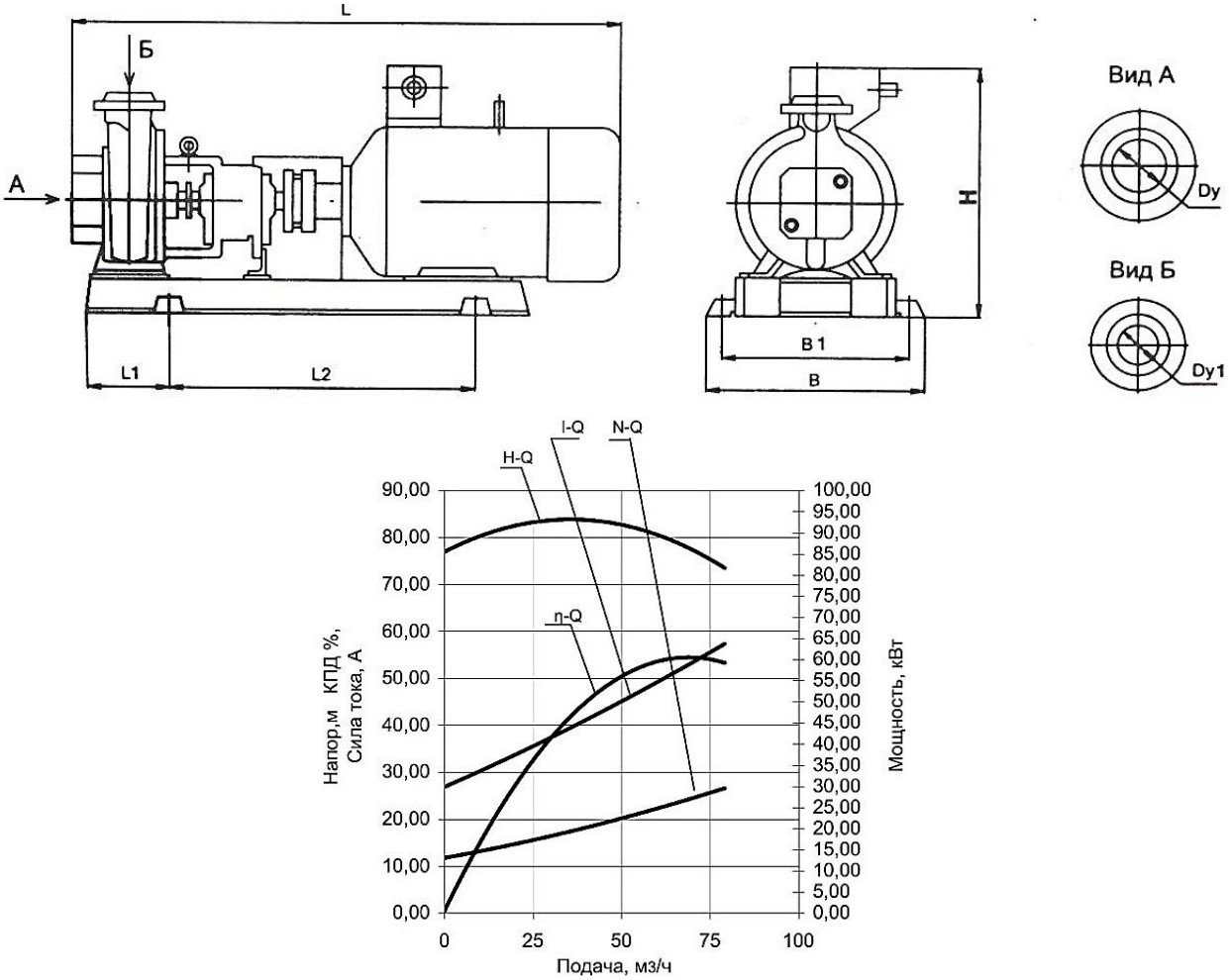


Рис. 5. Схема работы и чертёж насоса К80-50-250: *H–Q – напор H (м) в зависимости от подачи Q (м³/ч); η–Q – КПД η (%) в зависимости от Q (м³/ч); I–Q – сила тока двигателя III (А) в зависимости от Q (м³/ч); N–Q – потребляемая мощность N (кВт) в зависимости от Q (м³/ч)*

$$V_в = Q \cdot t \quad (6)$$

Запас объёма зумпфа для учёта дополнительных потоков.

Увеличение объёма на 30 %:

$$V_з = V_в \cdot 1{,}3$$

$$V_з = 1170\ м^3 \quad (7)$$

Конструкция зумпфа:

– прямоугольная форма с уклоном стенок для предотвращения осыпания грунта;

– дно и стенки зумпфа должны быть защищены бетонным покрытием, чтобы исключить просачивание воды в породы;

– проектирование уклонов дренажных каналов для направленного сбора воды в зумпф.

Расположение зумпфа:

– зумпф размещается на самой нижней отметке карьера, что обеспечит гравитационный сбор воды;

– обеспечивается доступность для насосного оборудования.

Схема подводящего и напорного трубопроводов изображена на *рис. 3.*

Схема коммутации насосного оборудования представлена на *рис. 4*. В *табл. 2, 3* приведены данные о расчёте водоотливной установки откачиваемую в бак на АБК и данные о напорной характеристике внешней сети [8].

Исходя из вышеизложенных результатов выбираем подходящий насос К80-50-250, который сможет обеспечить производительность 50 *м³/ч* и напор более 22 *м*. На *рис. 5* изображён чертёж и схема работы насоса К80-50-250. В *табл. 4, 5* приведены сведения о расчёте водоотливной установки, а так же о напорной характеристике внешней сети [9].

Более подходящим насосом для водоотливной установки в карьерных условиях является К100-80-125.

Для объективной оценки эффективности модернизированной схемы водоотлива был проведён сопоставительный анализ эксплуатационных затрат при использовании существующего и проектируемого насосного оборудования. В основу расчётов легли параметры типовых моделей насосов, объёмы перекачиваемой воды, продолжительность рабочих циклов, а также тарифы на электроэнергию, действующие в регионе.

Функционирующая в настоящее время система основана на использовании насосов типа Tsurumi KTZ415-51, номинальная производительность которых составляет до 120 *м³/ч.* Однако в сложившихся гидрогеологических и технико-эксплуатационных условиях данные насосы не обеспечивают необходимого уровня напора, что ведёт к увеличению времени наполнения резервуаров, временным остановкам технологического цикла и снижению эффективности производственного процесса. Годовой расход электроэнергии при круглосуточной эксплуатации оборудования составляет около 129,6 тыс. *кВт·ч*, что при действующем тарифе 1 000 сум за 1 *кВт·ч* соответствует годовому объёму затрат на уровне 129,6 млн *сум*.

Таблица 4

Расчёт водоотливной установки для откачки воды из карьера с последующим использованием в сельскохозяйственных целях

Требуемая расчётная подача насоса, *м³/ч*		100
Ориентировочный геометрический напор, *м*		12,1
Необходимое число последовательно соединённых колёс насоса		1
Расчётное давление воды в нагнетательном трубном ставе, *Мпа*		0,2
Труба	для нагнетания	133·7·8000
	для всасывания	159·7·8000
Скорость воды в подводящем трубопроводе, *м/с*	нагнетательный	2,54
	всасывающий	1,71
Коэффициенты линейных гидравлических сопротивлений	нагнетательного трубопровода	0,0396
	всасывающего трубопровода	0,0371
Сумма коэффициентов местных гидравлических сопротивлений	нагнетательного трубопровода	10,9
	всасывающего трубопровода	8
Обобщённый коэффициент сопротивления внешней сети		$3{,}073 \cdot 10^{-4}$

Таблица 5

Напорная характеристика внешней сети (%)

%	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %	125 %
Q, м³/ч	0	25	50	75	100	125
H_c, *т*	11	11,19	11,76	12,72	14,07	15,8

Указанные значения не учитывают дополнительные убытки, вызванные простоем оборудования и необходимостью внепланового технического обслуживания.

Разработка новой схемы водоотлива включает внедрение насосов марок К80-50-250 и К100-80-125, соответствующих расчётным требованиям по напору и производительности. Применение более энергоэффективных установок позволяет снизить годовой объём потребляемой электроэнергии до 97,2 тыс. *кВт·ч*, что при аналогичном тарифе даёт экономию в размере 32,4 млн сум ежегодно. Помимо сокращения расходов на электроэнергию, достигается повышение надёжности водоотлива и снижение эксплуатационных рисков, включая перебои в водоснабжении и ускоренный износ оборудования.

Снижение совокупных эксплуатационных расходов превышает 25 %, что позволяет сделать вывод о высокой экономической целесообразности перехода на новую схему. По предварительным оценкам, период окупаемости капитальных вложений в модернизацию системы составляет не более 2,5 лет, после чего эксплуатация новой установки будет сопровождаться прямой финансовой выгодой. Внедрение предложенного решения обосновано как с технической, так и с экономической точки зрения и может быть рекомендовано для практической реализации на участке «Западный» Карахтайского месторождения [10, 11].

Таким образом, на основании проведённого исследования сформулированы следующие выводы и рекомендации:

Выполнен всесторонний анализ геолого-гидрогеологических условий участка «Западный» Карахтайского месторождения, включая оценку строения массива, характеристик подземных вод и текущей водоотливной инфраструктуры.

Установлены основные факторы, влияющие на устойчивость откосов и безопасность горных работ.

Проведена техническая и эксплуатационная диагностика существующей водоотливной системы. Установлено, что применяемое насосное оборудование не обеспечивает требуемый напор и производительность, что вызывает технологические перерывы и приводит к накоплению воды в нижней части карьера.

На основе гидравлических и энергетических расчётов обоснована новая схема водоотлива с заменой оборудования на насосы марок К80-50-250 и К100-80-125, обладающих повышенной энергоэффективностью и соответствующие необходимым параметрам по производительности и напору.

Проведён технико-экономический анализ проектного решения. Установлено, что внедрение новой схемы позволяет снизить годовые эксплуатационные затраты более чем на 25 %, в том числе за счёт сокращения энергопотребления и устранения технологических простоев. Срок окупаемости вложений составляет менее 2,5 лет.

Предложенное инженерное решение учитывает карстовые особенности массива, высокий уровень трещиноватости горных пород, а также режимы сезонного водопритока, что обеспечивает надёжность и стабильность дренажной системы в долгосрочной перспективе.

Разработанная схема водоотлива обладает высокой степенью практической применимости и может быть рекомендована к внедрению на участке «Западный» с целью повышения безопасности и производительности горных работ, а также оптимизации производственных расходов предприятия.

Библиографический список:

1. Гришко А.П. Стационарные машины: учебник для вузов. Т. 2: Рудничные водоотливные, вентиляторные и пневматические установки. – М.: Горная книга, 2007. – 344 с.

2. Хаджиков Р.Н., Бутаков С.А. Горная механика. – М.: Недра, 1988. – 320 с.

3. Песвианидзе А.В. Расчёт шахтных подъёмных установок. – М.: Недра, 1986. – 280 с.

4. Попов В.М. Водоотливные установки. – М.: Недра, 1990. – 256 с.

5. Хаджиков Р.Н. Сборник задач и примеров по горной механике. – М.: Недра, 1988. – 192 с.

6. Губарёв А.С. Повышение эффективности рудничного водоотлива за счёт применения частотного регулирования насосов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 11. – М.: Горная книга, 2021. – С. 134-138.

7. Исаев П.Н., Быков А.С. Модернизация систем шахтного водоотлива на основе анализа энергетической эффективности // Горная техника и технологии. – № 3. – М.: Горная книга, 2020. – С. 45-51.

8. Жданов Е.С. Современные тенденции проектирования дренажных систем в карьерах открытого типа // Недропользование XXI век. – М.: НП НАЭН, 2022. – № 2. – С. 82-87.

9. Cheng Y., Zhou M. Optimization of Mine Dewatering Systems Using Intelligent Control of Multistage Pumps // Journal of Mining Science. – 2021. – Vol. 57(1), pp. 11-18. DOI: 10.1134/S1062739121010037

10. Li X., Tang L. Energy-saving technologies in open-pit mine dewatering operations: A case study in China // Mining Technology. – 2020. – Vol. 129(4), pp. 237 -246.

11. Князев А.Н. Инновационные насосные агрегаты для шахтного водоотлива и перспективы их внедрения // Вестник горной науки. 2019. – № 6. – С. 74-79.

УДК 551.435:553.98

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.008

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ САЙЛЯКУДУК В ЦЕНТРАЛЬНЫХ КЫЗЫЛКУМАХ




Шарипов Ш.Ф.,
начальник отдела
«Геология, добыча, переработка
драгоценных, цветных металлов и урана»
Навоийского отделения АН РУз.,
PhD, доцент

Фатхуллаева З.М.,
заведующая кафедрой
«Геодинамика и тектоника»
Национального университета
Узбекистана

Курбонов А.В.,
докторант
Навоийского отделения АН РУз

Элмуродов О.Ф.,
докторант
Навоийского отделения АН РУз

Ushbu maqolada Markaziy Qizilqumda joylashgan Saylaquduq ko'lining geologik tuzilishi hamda undagi tuzli qatlamlarning shakllanish omillari haqida ma'lumotlar keltirilgan. Tadqiqotlar jarayonida tuzli yotqiziqlar asosan evaporit jinslardan iborat ekanligi va ularning shakllanishi iqlim, paleogeografik hamda gidrogeologik sharoitlar bilan bog'liqligi aniqlangan. Ko'l hududidagi stratigrafik qatlamlar va mineral tarkib geologik kesimlar asosida o'rganilgan. Shuningdek, suvli eritmaning kimyoviy tarkibi tahlil qilinib, konning gidrogeokimyoviy holati haqida xulosalar chiqarilgan.

Kalit so'zlar: *Kontinental galogen qatlamlar, sho'r suvlarning tarkibi (xloridlar, sulfatlar, karbonatlar), evaporit jinslar, galogenez jarayonlari, Markaziy Qizilqum tuz konlari, kompleks kimyoviy tahlil.*

В данной статье приводятся данные о геологическом строение озера Сайлякудук, расположенного в Центральных Кызылкумах, а также факторы формирования солевых отложений. В ходе исследований установлено, что соляные отложения преимущественно представлены эвапоритовыми породами, а их формирование связано с климатическими, палеогеографическими и гидрогеологическими условиями. Стратиграфические слои и минеральный состав района озера были изучены на основе геологических разрезов. Кроме того, проведён анализ химического состава водной вытяжки, что позволило сделать выводы о гидрогеохимическом состоянии месторождения.

Ключевые слова: *Континентальные галогенные отложения, состав солёных вод (хлориды, сульфаты, карбонаты), эвапоритовые породы, процессы галогенеза, солевые месторождения Центральных Кызылкумов, комплексный химический анализ.*

Несмотря на обширные исследования соляных отложений в Центральной Азии, данные о геологическом строении и условиях формирования солевых залежей озера Сайлякудук в Центральных Кызылкумах остаются недостаточно изученными. Месторождение отличается рядом уникальных геологических и минералогических особенностей, которые могут оказать существенное влияние на понимание процессов галогенеза в континентальных условиях. Представленное исследование вносит значимый вклад в развитие региональной геологии и расширяет базу данных по минералогии и химическому составу натриевых сульфатов. Полученные результаты могут стать основой для дальнейших поисков и рациональной разработки солевых месторождений в аналогичных геологических условиях.

Месторождение Сайлякудук расположено в 50 *км* северо-западнее совхоза Дженьгельды (западное окончание гор Кульджуктау). До ближайшего населенного пункта совхоза Дженгельды 7-8 *км* (*рис. 1*). По анализу опубликованной литературы и других источников, какие-либо сведения о соленакоплении озера Сайлякудук отсутствуют. Месторождение расположено в небольшой (4х4 *км*) пологой на западе, юге и востоке, но крутой на севере впадине, выработанной в палеогеновых породах и в частности в эоценовых глинах. Дно впадины углублено на 20-30 *м* относительно южных склонов и более чем на 100 *м* – относительно северных и северо-восточных и покрыто засоленным песчано-гравийным материалом со значительной примесью гипсового песка и гипсовой муки (*рис. 1*). Последняя местами имеет мощность 15-20 *см*. Абсолютная отметка дна впадины равна 149 *м* [1].

По материалам дистанционного зондирования, в структурном отношении озеро Сайлякудук расположено в параллельной линеаментной зоне вытянутых в юго-западном направлении, характеризующееся изменением рельефа, представляющую собой предгорную равнину на севере, крутыми впадинами в южном продолжении равнины (*рис. 2*).

Соляная залежь расположена у северо-восточной части впадины и имеет размеры порядка 0,5х1,5 *км*. Контуры залежи довольно чётко определяется по снежно-белой пушонке тенардита, образующейся от обезвоживания мирабилита и видна на далёком расстоянии.

В отличие от других месторождений, здесь рапа отсутствует. Разрез соляного пласта в юго-западной части залежи, судя по скважине 15 следующий (сверху вниз):

1) супесь буроватая светлая за счёт значительной примеси пушонки тенардита, на отдельных участках плотный тенардит 2-3 *см*;

2) тенардит (пушонка) сахарно-белый 12-15 *см;*

3) мирабилит сахаровидный, стеклянно-прозрачный, рыхлый, средне кристаллический – 55 *см*;

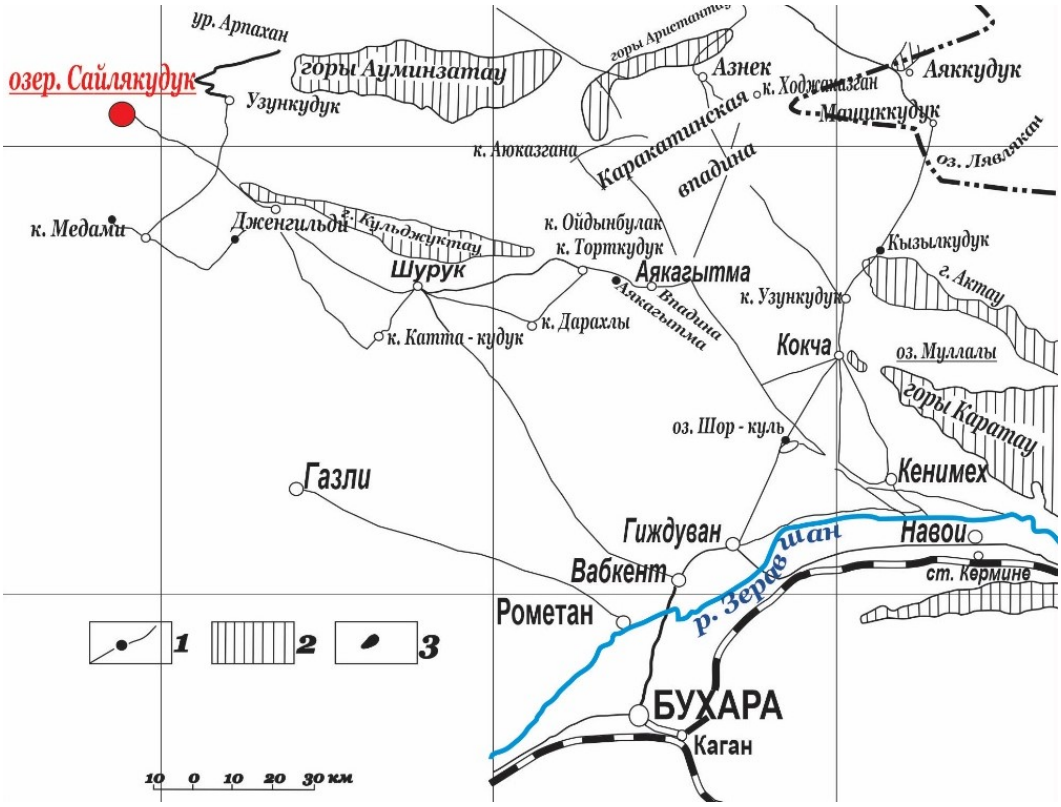


Рис. 1. Обозначенная карта распространения современного солёного озера Сайлякудук в Центральных Кызылкумах: *1 – маршруты и точки наблюдений в зонах засоления; 2 – выходы пород палеозойского возраста; 3 – крупнейшие солёные озёра и месторождения (указаны схематично)*

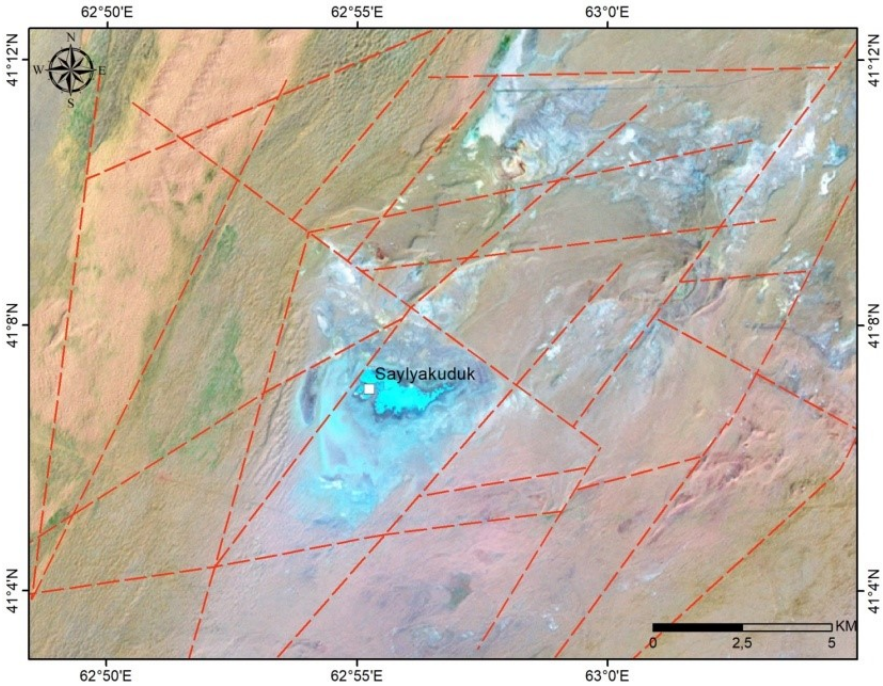


Рис. 2. Космоструктурная схема участка озера Сайлякудук (масштаба 1:100 000)

4) мирабилит иловатый – 11 *см*;
5) супесь буровато-серая с чечевицами гипса – 12 *см*;
6) песок серый глинистый до глубины 117 мощностью – 24 *см*;
7) мощность тенардит-мирабилитовой залежи от 70-80 *см*.

Весьма вероятно, что в других частях залежи мощность соляного пласта окажется намного большей.

Химический анализ сахаровидного мирабилита показал, что нерастворимый остаток в нем составляет 2,78 %; вода – 47-82, а сульфат натрия – 48,92. Сумма остальных примесей (хлора, кальций и магния) не превышает 1,5 %.

В геологическом строении участвуют верхнемеловые пески, песчаники, глины (*рис. 3*), перекрытые палеогеновыми глинами с мергелями и известняками в основании. Расположенная к северу останцовая возвышенность сложена палеоцен-миоценовыми красноцветными глинами, алевритами и песчаниками. Сухое соляное озеро размещено на эоценовых глинах южного крыла синклинали, ядром которой служит останцовая возвышенность, мирабилитовая залежь расположена у еверо-восточной части впадины, ее размер 0,5х1,5 *км*. Контуры залежи чётко определяются по снежно-белой пушонке тенардита, образующейся от обезвоживания мирабилита, видной на далеком расстоянии [2].

Мощность тенардит-мирабилитовой залежи около 0,70-0,80 *м*.

Минеральный состав её прост: кроме мирабилита, тенардита и гипса, отмечается лишь незначительная примесь галита и эпсомита. Мирабилит и тенардит образуют иногда очень чистые водяно-прозрачные кристаллы размером 1-3 *мм*, плотно сросшиеся друг с другом. Химический состав соляных отложений и результаты спектрального анализа солей Центральных Кызилкумов представлены в *табл. 1-3*. Среди соляных отложений присутствуют довольно чистые разновидности сульфата натрия (обр. 22/1, 22/2, 23/3). Примесь хлористого натрия незначительна. Иловый мирабилит содержит более 5 % карбоната магния и около 14 % – песчано-глинистого вещества. Запасы мирабилита, предположительно, превышают 0,5 млн. *т*. Питается залежь преимущественно за счёт стока весенних вод с прилегающих возвышенностей [3].

Грунтовые воды в районе соленакопления отсутствуют, а в ближайших колодцах (расположенных в 5-10 *км* южнее и западнее) залегают на глубинах 30-35 *м* не принимая участия в солевом питании залежи.

Генезис соляных компонентов, поступающих в солеродный бассейн, устанавливается по наличию повышенного количества гипса в коренных породах палеогена и неогена водосборной площади и хлористого натрия, засоляющего отложения морского происхождения. Под воздействием атмосферных осадков из этих досовременных эвапоритов извлекается сульфатный ион и натрий и образуется мирабилит.

Тип галогенеза – отчетливо сульфатный (натриевый подтип).

Естественная засолённость коренных пород, образующихся в пределах впадины, может быть определена по засолённости палеогеновых глин других участков региона. Так, например, в глинах у оз. Муллалы содержится 13,89 % водорастворимых солей (из них – 1,64 сульфата натрия и 6,13 хлористого натрия), у оз. Каратерен – 5,45 % (обр. 21/1), у оз. Лявлякан I – 8,35 % (обр. 21/2) и др. Гипс в коренных породах имеет эпигенетическое происхождение: он либо заполняет трещины шириной 2–3 см в глинистых породах, либо образует на их поверхности своеобразные плоские образования в виде розоцветов. Хотя сумма атмосферных осадков в районе оз. Сайляукудук и невелика (около 100 *мм/год*), но выпадают они большей частью в виде ливней. Вода, попадая на поверхность водоупорных глин и вымывая из них соляные компоненты (в основном, ионы SO_4 и Na), не успевает проникнуть глубоко в коренные породы и стекает на дно бессточной впадины, где и испаряется.

Важно отметить, что соляная залежь залегает на дне впадины, выработанной в глинах палеогена, являющихся региональным водоупором в пределах водосборного бассейна Аральского моря. Данный факт, как это будет видно из дальнейшего изложения материала, принят автором в качестве критерия при поисках после палеогеновых континентальных солей в регионе. Как уже выше говорилось, соленакопление в пределах шоровых низин протекает аналогично соляноозерным, но ввиду их проточности или малого количества поступающих сюда солей, в них не скапливаются галогенные осадки большой мощности [4].

Структурно-литологические условия, обусловленные залеганием эоценовых глин палеогенового возраста, способствуют аккумуляции солей, главным образом в виде мирабилита и тенардита. Водоносных горизонтов в пределах впадины не зафиксировано, а питание залежи происходит преимущественно за счёт сезонного поверх-

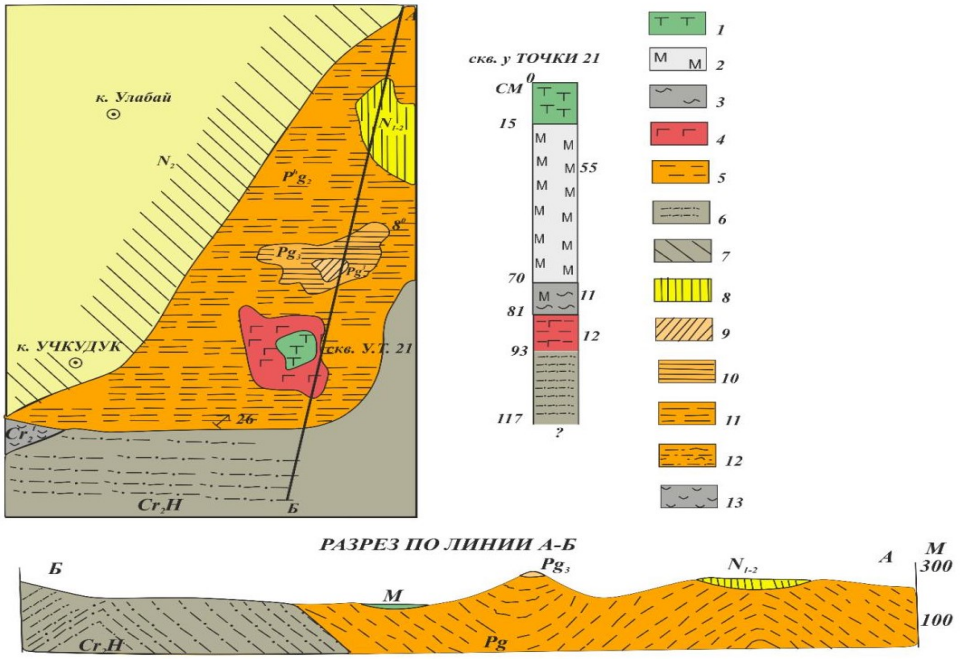


Рис. 3. Схема строения Сайлякудукской соляной залежи: *1 – пушонка тенардита, 2 – мирабилит, 3 – ил, 4 – гипс, 5 – глина, 6 – глина, пески, 7 – верхний неоген, 8 – миоцен-плиоцен, 9 – олигоцен, 10 – сумсарский ярус, 11 – нижний эоцен, 12 – низы верхнего мела, 13 – турон*

Таблица 1

Химический состав водной вытяжки (вес. %) соляных отложений оз. Сайлякудук

Номер образца	Глубина, *см*	Содержание ионов							Нерастворимый остаток	Вода	Сумма ионов
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na1^{+}$	Kl^{+}	$CO_32^{-}+HCO31-$	SO_4^{2-}	$Cl1^{-}$			
21/1	до 15	2,40	–	11,69	–	1,22	30,78	–	51,66	2,54	100,29
22/2	–	–	–	24,70	–	1,22	68,47	–	0,84	4,67	99,90
23/3	–	–	–	32,33	–	0,61	66,66	–	-	-	99,60
24/4	20	0,60	0,09	15,22	сл.	–	33,08	0,42	2,78	47,82	100,01
25/6	81	0,49	0,24	9,54	0,08	0,12	21,85	0,19	22,56	44,64	99,71
26/7	93	0,38	0,48	1,17	0,20	0,12	5,00	0,26	82,36	17,49	100,11

Примечание: *пробы 1-3 – тенардит; 4, 6 – мирабилит; 7 – супесь с гипсом. "сл." – следы (очень малое количество)*

Таблица 2

Химический состав воднорастворимых солей Центральных Кызылкумов

№№ обр.	Место взятия	Определение образца	Нераствор. остаток	H_2O	*Cl*		SO_4		*Na*		*K*		*Ca*		*Mg*		Сумма, %
					г/%	*г/экв*	*г/%*	*г/экв*	*г/%*	*г/экв*	*г/%*	*г/экв*	*г/%*	*г/экв*	*г/%*	*г/экв*	
25/2	Сайляукудук	галит	3,88	47,82	0,42	11,99	33,08	688,15	15,22	662,16	следы		0,60	29,99	0,09	7,99	100,01
27/3	Котл. Аяк-Агытма	галит	0,66	0,32	57,62	57,62	2,47	51,35	38,21	1662,31	следы		0,24	12,00	0,02	1,99	99,60
44	Котл. Караката	галит	8,77	1,18	49,64	49,64	5,51	114,69	33,16	1442,66	следы		0,98	49,00	0,28	22,99	100,43

Таблица 3

Результаты спектрального анализа солей Центральных Кызылкумов

№ проб	Краткая характеристика пробы	Обнаруженные элементы																		
		Si	*Al*	*Mg*	*Ca*	*Fe*	*Mn*	*Ni*	*Co*	*Ti*	*V*	*Zr*	*Cu*	*Be*	*Na*	*Sr*	*Ba*	*K*	*Li*	*Rb*
11/в	Мирабилит	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	0,01	0,001	0,001	0,1	0,003	0,01	0,001	0,001	< 0,001	> 1	0,01	0,01	≈ 1	0,0004
19/х	Астраханит	≈ 0,1	0,003	> 1	0,1	0,01	0,001	–	–	0,001	–	–	–	–	–	> 1	–	–	–	0,0003
21	Супесь (засоленная)	0,06	0,03	0,1	0,3	0,006	0,001	–	–	0,003	–	–	–	–	> 1	–	–	–	–	–
21/3	Галит	0,06	0,03	0,3	0,6	0,01	0,001	–	–	0,001	0,001	–	–	–	> 1	–	–	–	0,0002	0,0002

Примечание: *концентрации элементов даны в процентах*

ностного стока с прилегающих возвышенностей. Минералогический состав залежи отличается простотой и высокой степенью чистоты. Основными компонентами являются Na_2SO_4 (мирабилит и тенардит), гипс, с незначительными примесями галита и эпсомита. Химический анализ показывает высокое содержание сульфата натрия (до 48,92 %) и крайне малое количество хлоридов, магния и кальция, что подтверждает сульфатный (натриевый) тип галогенеза [5]. Структурные и стратиграфические особенности региона, наличие гипсоносных и соленосных коренных пород, особенности питания и отсутствия рапы позволяют отнести месторождение Сайляукудук к типичным континентальным после палеогеновым соленакоплениям. Установленные закономерности могут быть использованы как критерии при дальнейших поисках и оценке ресурсов натриевых сульфатов в аналогичных геологических условиях.

Соленакопление хлоридно-натриевого состава, вероятнее всего, связано с переотложением этих солей из эоценовых глин, которые имеют морское происхождение. Это способствовало обогащению соленакопления хлористым натрием.

Предполагается, что формирование месторождений сульфата натрия обусловлено длительным антропогенным воздействием, направленным на извлечение хлора и натрия из природных хлоридно-натриевых рассолов, концентрирующихся в зонах соленакопления. Это, в свою очередь, способствовало обогащению сульфатом остаточный рассол рапы.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что на озере в прежние годы и частично в недалеком прошлом, добывался не сульфат натрия, а поваренная соль.

Заключение. Исследование соляных отложений месторождения Сайлякудук выявило ряд важных особенностей, отличающих данное месторождение от других солевых бассейнов Центральной Азии. Простота и высокая степень чистоты минералогического состава, а также специфические гидрогеохимические условия формируют благоприятные перспективы для промышленного освоения запасов сульфата натрия. Выявленные закономерности могут служить критериями при поисках новых залежей в регионах с подобным палеогеологическим строением. Полученные результаты расширяют существующую базу данных и вносят важный вклад в развитие региональной геологии, что имеет практическое значение для дальнейших поисков и рационального использования солевых ресурсов региона.

Библиографический список:

1. Рубанов И.В. Современные солевые отложения Центральных Кызылкумов. – Ташкент: «Фан». 1961. – 71 с.

2. Рубанов И.В. Неоген-антропогеновые сульфатные образования. В кн. Постпалеозойские отложения Узбекистана. – Ташкент: «Фан» УзССР, 1973. – С. 33-38.

3. Рубанов И.В. И д. р. Хлоромагниевый раствор (бишофит) Лявляканских озёр Кызылкумов – целебный полезный минерал. Узбекский геологический журнал. – № 5. – Ташкент: «Фан» УзССР, 1991. – С. 23-28.

4. Шарипов Ш.Ф., Мирзаев А.У. Минеральные соли в современных озёрах Центральных Кызылкумов // Горный вестник Узбекистана, – № 4, (87) – Навои, 2021. – С. 46-49.

5. Шарипов Ш.Ф., Мирзаев А.У. Минеральные соли современных озер Тузкудук и Сайлякудук в Центральных Кызылкумах // Горный вестник Узбекистана. – № 1 (91). – Навои, 2022. – С. 53-57.

УДК 551.243.4 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.009

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗОЛОТОРУДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ БЕЛЬТАУ (ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КЫЗЫЛКУМЫ)



Умматов Н.Ф.,
младший научный сотрудник
ГУ «Институт минеральных ресурсов»

Турапов М.К.,
главный научный сотрудник
ГУ «Институт минеральных ресурсов»
д.г.-м.н, профессор, академик РАЕН

Шарипов Ш.Ф.,
начальник отдела
Навоийского отделения АНРУз,
PhD, доцент

Ushbu ish oltin minerallashuvining shakllanishi davrida Daugiztov ma'danli maydonining geodinamik holatini o'rganishga bag'ishlangan. Oltin konlarini joylashishida blok tektonikasining roli ko'rsatilgan. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, ruda hosil bo'lish davrining geodinamikasi uzluksiz tuzilmalar va ularning ta'siri ostidagi tektonik bloklarning faolligini belgilovchi gorizontal harakatlarning ustunligi bilan tavsiflanadi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, Beltovning asosiy strukturaviy xususiyati sharqda chegaradosh Daugiztov chuqur yorig'idir. Bu ruda tashuvchi va ruda nazorat qiluvchi strukturadir. Ruda hosil bo'lish davrining geodinamik holati shimoli-sharqiy yoriqlar va tektonik bloklarning faolligi bilan tavsiflanganligi aniqlandi. Tadqiqot hududida shartli ravishda yettita blok belgilangan. Har bir blok o'ziga xos tektonik kuchlanish taqsimoti va deformatsiyalari bilan tavsiflanadi. Bloklarning geodinamikasi, ayniqsa, ularning xanjar shaklidagi uchastkalari yangi uzluksiz strukturalarning paydo bo'lishiga olib keldi, ular avvalgilari bilan birga konning shakllanishida va ularning chegaralarida oltin mineralizatsiyasini joylashtirishda muhim rol o'ynadi.

Kalit so'zlar: *geodinamika, yoriqlar, ruda maydoni, blok, kon, faollik, deformatsiya, yoriqlar, omillar, chegara yorig'i, siljish.*

Работа посвящена изучению геодинамической обстановка Даугызтауского рудного поля во времени формирования золотого оруденения. Показана роль блоковой тектоники в размещении золоторудных месторождений. Как показывают исследования геодинамика периода рудообразования характеризуется господством горизонтальных движений, обусловивших активность разрывных структур, а под их воздействием тектонических блоков. Как показывают исследования, главной структурной особенностью Бельтау является Даугызтауский глубинный разлом ограничивающий его с востока. Он является рудораспределяющей и рудовыводящей структурой. Установлено что геодинамическая обстановка периода рудообразования характеризуется активностью северо-восточных разломов и тектонических блоков. В исследуемой площади условно выделены семь блоков. Для каждого блока характерна своя картина распределения тектонических напряжений и деформация. Геодинамика блоков в особенности их клиновидных участков обусловили образование новых разрывных структур, которые совместно с раннее образованными сыграли важную роль в формировании месторождении и в размещении золоторудной минерализации в их переделах.

Ключевые слова*: геодинамика, разломы, рудное поле, блок, месторождение, активность, деформация, трещины, факторы, граничный разлом, смещение.*

Бурное развитие экономики Узбекистана, появление новых производственных отраслей требует укрепления и расширения минерально-сырьевой базы горнорудных районов республики, где действуют производственные мощности по переработке минерального сырья. Центрально Кызылкумский регион – это один из уникальных золоторудных провинций мира, где размещенён ряд крупных месторождений золота среди которых следует отметить гигантское месторождение Мурунтау. В последние годы для Центральных Кызылкумов основной проблемой является укрепление сырьевой базы золота. Причиной этому является сокращение до минимума лимита поверхностных и близ поверхностных месторождений. В решении проблемы минерально-сырьевой базы района главным путём являются поиски новых объектов, прогнозно-поисковые работы на перспективных площадях и на флангах известных и отрабатываемых месторождений. К числу последних относится Даугызтауское рудное поле с золоторудными месторождениями Даугызтау, Асаукак, Амантайтау, Высоковольтное (*Au*, *Ag*) и др.

Многие исследователи (И.Х. Хамрабаев, Х.О. Рахматуллаев, А.В. Королёв, Е.М. Некрасов, Ф.И. Вольфсон, А.Д. Швецов, Ю.С. Савчук, М.К. Турапов, Р.Х. Миркамалов, М.М. Мансуров, Б.О. Жанибеков, Х. Омонов и др.) [1, 2] изучавщие золоторудные объекты Центральных Кызылкумов отмечают большую роль структурных факторов и их динамики в процессах формирования и размещения гидротермальных золоторудных месторождения.

Эти факторы, как отмечают В.И. Казанский, Е.П. Малиновский, Г.Б. Наумов и др. определяют пути миграции гидротермальных растворов, пространственное положение рудных тел, а также их морфологию.

К настаящему времени в пределах Центральных Кызылкумов проведены огромные работы по изучению генезиса, закономерностей формирования и геолого-структурных условий размещения, золоторудных проявлений и локализации в их пространствах золотого орудения. Однако в последнее время увеличение объёма геологических исследований и геолого-поисковых работ не приводит к открытию новых месторождений золота в регионе, что, следовательно, препятствует укреплению минерально-сырьевой базы золота и является актуальной проблемой номер один для Центральных Кызылкумов.

В данной обстановке изучение тектонической напряженности и деформации площади проявления эндогенного оруденения с моделированием их структур на основе принципов тектонофизических

исследований М.В. Гзовского позволит расшифровать механизм образования и развития рудоконтролирующих структур, а также установить взаимосвязь напряжённости и деформации с процессами рудообразования. Результаты геолого-структурных исследований являются важнейшим фактором в изучении (моделировании) тектонофизических особенностей структур рудных объектов.

Результаты этих работ в комплексе с данными изучения геолого-геофизических, и космогеологических исследований являются основой новой методики расшифровки геодинамической обстановки рудных районов; рудных полей и месторождений.

Целью исследования является – выявление особенности геодинамической обстановки Даугызтауского рудного поля в период рудообразования и установление влияния тектонических блоков и разломов на размещение золоторудной минерализации.

Задачи исследования:

Определить структурно-тектонические особенности рудного поля;

Изучить характер и распределение тектонических напряжений и деформаций в пределах выделенных блоков;

Выявить взаимосвязь между активностью разломов, динамикой блоков и процессами рудообразования;

Разработать модель геодинамической обстановки, объясняющую размещение золоторудных месторождений.

Методика направлена на: восстановление динамики рудоконтролирующих структур в процессах рудообразования; определение взаимоотношения динамики структур с напряженностью и деформацией; установление степени активности рудоконтролирующих структур; влияние активности на динамику тектонических блоков и на образование новых структур; установление взаимосвязи всех этих явлений, а также с процессом рудообразования.

Результаты исследований. Даугызтауское рудное поле с месторождениями золота Даугызтау, Асаукак, Высоковольтное и другими занимает всю территорию гор Бельтау. Как указывают исследователи, главной структурно-тектонической особенностью Бельтау является ограничивающая его с востока рудоконтролирующая (по А.В. Королеву — рудораспределяющая) разрывная структура северо-восточного простирания.

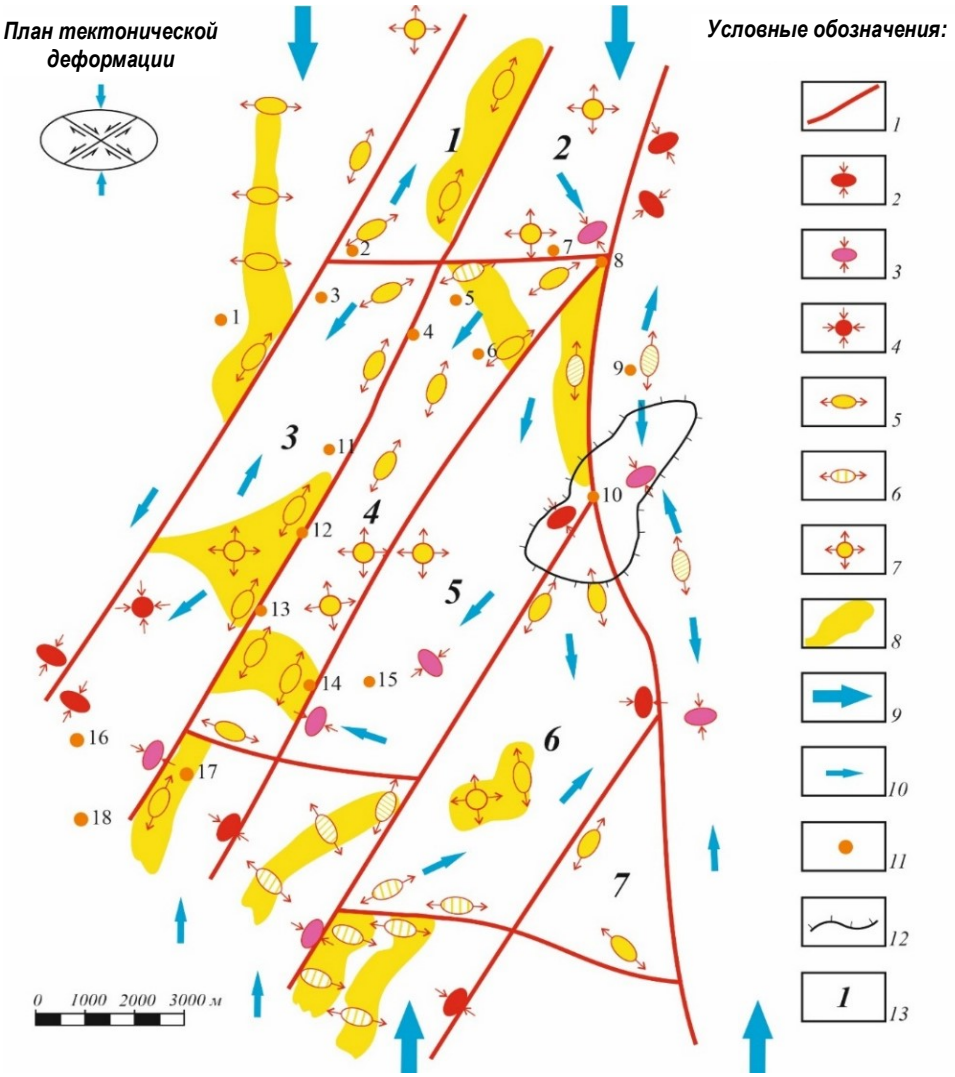


Рис. 1. Схема геодинамической обстановке период рудообразования Даугызтауского рудного поля. Вариант III (основа в масштабе 1:50000): *1 – разломы; 2 – зона локального сжатия; 3 – предполагаемая зона сжатия; 4 – зона всестороннего сжатия; 5 – зона локального растяжения; 6 – предполагаемая зона растяжения; 7 – зона всестороннего растяжения; 8 – площади растяжений; 9 – направление регионального поля сжатия; 10 – направление смещений локальная участков; 11 – рудопроявления; 12 – граница палеозойского фундамента; 13 – номера блоков*

Другой не менее важной особенностью является блоковое строение, обусловленное системами северо-восточных и широтных разломов, которые являются основными тектоническими структурами, участвовавшими в процессе рудообразования и определявшими геодинамическую обстановку гор Бельтау, а соответственно – и Даугызтауского рудного поля. Это блоковое строение влияло на формирование рудных объектов и размещение золоторудной минерализации в их пределах.

По мнению И.Х. Хамрабаева Л.П. Зоненщайна, Н.Н. Усманова Т.Н. Далимова, П.А. Мухина, Ю.С. Савчука, И.М. Голованова, Р.Х. Миркамалова и др., региональная тектоника и геодинамика герцинской металлогенической эпохи запада южного Тянь-Шаня, соответственно и Центральных Кызылкумов обусловлены тектоникой литосферных плит, при господстве горизонтальных движений. В результате этих процессов преобразовалось структурно-тек-тоническое строение региона с образованием шарьяжных и надвиговых структур, сопровождавшихся активностью магматических явленой. Динамика этих процессов в сочетании с литологическим составом, физико-механическими, петрографическими и химическими особенностями вмещающих горных пород создала благоприятные природно-геологические условия для циркуляции горячих гидротермальных растворов из недр Земли, их миграции в породах и их неоднородностях с

последующим осаждением рудных элементов. Для получения данных о тектонической напряженности и деформации площади Даугызтауского рудного поля в периоде рудообразования, где эти результаты являются основой восстановления геодинамической обстановки формирования и размещения золотого оруденения были проведены тектонические исследования по изучению напряжённости и деформации в модели структур рудного поля.

Как позывают результаты исследования геодинамическая обстановка площадей Бельтау, соответственно и рудного поля периода рудообразования характеризуется тем, что воздействие на них региональных тектонических сил активизировало их разрывные структуры. Активность северо-восточных разломов вызвали движение блоков относительно друг друга. Морфология блоков и их пространственное расположение в структурной сети рудного поля прямо влияют на характер их движения, на напряженность и деформацию геологических образований. В площади рудного поля условно выделено 7 блоков (*рис. 1*).

Первые два небольших блока занимают северную часть рудного поля. Для блоков характерна концентрация напряжений с усилением деформации вдоль зон их восточных границ. Концентрация напряжений здесь вызвана геодинамической обстановкой характеризующейся активностью восточной граничной структуры рудного поля – Даугызтауского глубинного разлома за счёт воздействия внешних динамических сил. Характер и направленность динамики восточного граничного разлома обусловили миграцию касательных напряжений в этих блоках и их концентрацию вдоль этой структуры и усилили деформацию пород с формирование зон локальной деформации сжатия.

Блок 3 характеризуется геодинамикой; где его граничные разломы активизировались, за счёт выклинивания северных блоков в юго-восточном направлении. Выклинивание блоков обусловлено активностью их граничных разломов и их морфологией. Формировались зоны локальной деформации растяжения с падением напряженности: южная территория блока находится под влиянием умеренных и сильных величин касательных напряжений, где наблюдаются несколько зон локальной деформации сжатия.

Расположение их вдоль границ блока свидетельствуют о том, что природа их образования тесно связана с тектонической активностью, т.е. динамикой граничных разломов. Для блока характерно проявление разнонаправленных локальных смещений его отдельных участков. Северная территория смещается в юго-восточном направлении. В центре блока сформировалась мощная зона локальной деформации растяжения от которой в юго-восточном и северо-восточном направлениях наблюдается растяжение.

Центральный блок и рудное поле по своей геодинамике отличаются от других блоков. Пассивный характер геодинамики этого блока обусловил низкий уровень тектонической напряжённости и деформации. Наблюдаемые движения (сдвиги) по граничным разломам имеют локальный характер. Вероятно, пассивность разломов определяется положением блока в центре структурной сети рудного поля и ограничением с юга и севера широтными разломами, которые расположены перпендикулярно направлению приложенных в модели усилий сжатия.

Одним из активных структурных элементов рудного поля является – блок 5. Его активность определяется совместным воздействием на него северо-восточных разломов и Даугызтауской глубинной структуры. На севере блока за счёт сопряжения северо-восточного разлома (системы Асаукакского разлома) и Даугызтауской глубинной структуры сформировалась клиновидная структура, которая за счёт своей морфологии выклинивается в южном направлении. Это геологическое явление сопровождалось снижением напряжённости до минимума и проявлением деформаций растяжения в условиях региональной деформации сжатия. Процесс выклинивания вызвал миграцию напряжений и их концентрацию с усилением деформаций к северу от участка сопряжения Асаукакского разлома с Даугызтауской структурой. Вдоль западной граничной структуры блока формировалась зона локальной деформации растяжения. Южная территория блока характеризуется геодинамической пассивностью. Причиной этого явления, по-видимому, является наличие широтного разлома, ограничивающего блок с юга.

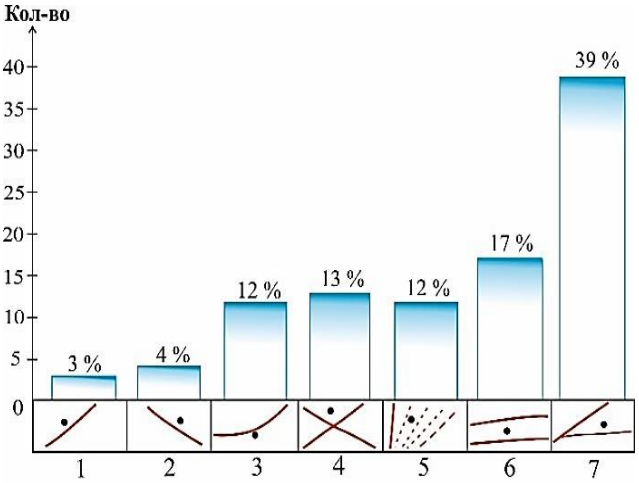


Рис. 2. Распределение золоторудных проявлений Бельтау по структурным позициям: *1 – зона северо-восточного разлома; 2 – зона северо-западного разлома; 3 – зона искривления разлома; 4 – зона пересечении разломов; 5 – зона скалывания; 6 – зона субпараллельных разломов; 7 – зона клиновидной структуры*

Блок 6 с северо-запада и юго-востока ограничен северо-восточными рудоконтролирующими разломами, с юга — субширотным разломом, а с востока — Даугызтауской глубинной структурой-Геодинамика всей территории блока и ограничивающих его структур характеризуется высокой активностью движения.

Северный и юго-западный участки блока, имеющие форму клина, проявили активность в виде смещений соответственно в южном и северо-восточном направлениях. Эти процессы сопровождаются миграцией касательных напряжений и их концентрацией в восточной части блока, в зоне сопряжения северо-восточного разлома с Даугызтауской глубинной структурой. Одновременно с миграцией и концентрацией напряжений наблюдается усиление деформации с образованием зоны локальной деформации сжатия. О важности деформаций и их последствий, в особенности локальной деформации растяжения, обусловленной региональной деформацией сжатия, отмечали А.В. Королев и П.А. Шехтман, Х.А. Акбаров [3], М.К. Турапов и другие исследователи [4-6]. Л.И. Лукин, Ф.И. Вольфсон и др. отмечают, что задачей изучения структуры месторождения можно считать главным выяснение генезиса его формы (стереогенез) со всеми осложнениями, связанными с деформациями и движениями в процессах рудообразования.

Геодинамика клиновидных участков блока 6 способствовала образованию локальных зон деформации растяжения, что естественно отразилось на напряжённости, понижая её до минимума. Понижение напряжённости сопровождается миграцией касательных сил из зоны локального растяжения с высвобождением энергии сжатия. Процесс высвобождения энергии сопровождается трещинообразованием с последующим разрушением структуры геологических образований.

В клиновидных участках, в зонах граничных разломов блока при их активности теоретически должны формироваться новые структуры – трещины отрыва, которые формируются под некоторым углом по отношению к простиранию разломов. Во многих золоторудных месторождениях Чаткало-Курамы (Гузаксай, Кочбулак)

такие структуры играют важную роль в размещении золотого оруденения и являются рудовмещающими. В основном определяется секущий тип оруденения с жильной, сложной и линзообразной морфологией. Последствия геодинамических процессов в блоках, особенно в их клиновидных участках, обусловили образование новых тектонических структур, которые вместе с ранее сформировавшимися сыграли ключевую роль в размещении золоторудных месторождений и локализации золотого оруденения в их пределах. Геолого-структурная позиция месторождений рудного поля определяется метатерригенными образованиями Бесапанской свиты и зонами сопряжения северо-восточных разломов с Даугызтауской глубинной структурой.

Необходимо отметить, что при моделировании напряжений в структурах Даугызтауского рудного поля в клиновидном участке блока 6 наблюдалось приоткрытие граней северо-восточного разлома и зоны Даугызтауского глубинного разлома.

Если результаты моделирования соответствуют природным явлениям этапа рудообразования, можно сделать вывод, что приоткрытые грани разломов служили каналами для миграции гидротермальных растворов из глубин Земли. Именно таким каналом могла являться зона приоткрытия граней разломов, поскольку месторождение Даугызтау пространственно приурочено к этой зоне.

Аналогичную структурную позицию занимает месторождение Асаукак. Месторождение Амантайтау, подобно Даугызтау и Асаукаку, контролируется клиновидной структурой, однако его позиция определяется не участком сопряжения разломов, а зоной локальной деформации растяжения, образованной в центре клиновидной структуры.

Блок 7 расположен в юго-восточной части рудного поля. По морфологии (треугольник) и по геодинамической обстановке он отличается от других блоков. Его геодинамическая обстановка периода рудообразования характеризуется проявлением активности всех его граничных разломов. При этом их активность имеет локальной характер. По западному борту разлома наблюдается сдвиг в южном направлении, тогда как на противоположном борту – в северном направлении.

Локальные движения, направленные навстречу друг другу по бортам Даугызтауского разлома и зафиксированные в участке изменения его морфологии, концентрируют касательные напряжения и усиливают деформацию пород вдоль западного борта Даугызтауской структуры. По северо-восточному и субширотному граничным разломам наблюдается обратная картина: активность разломов направлена от их центра в сторону сопряжения с Даугызтауским разрывом. Эти явления обусловили формирование локальных зон деформации растяжения в пределах блока 7.

По характеру миграции и концентрации касательных напряжений, а также изменению деформации площадь блока 7 можно подразделить на две части, которые относительно друг друга смещаются в противоположных направлениях: восточная часть, приуроченная к Даугызтаускому разлому, смещается в северо-восточном направлении, а западная – в юго-западном. При такой геодинамике в локальных зонах деформации растяжения теоретически должны формироваться трещины отрыва северо-западного направления. В природном аналоге этой площади наблюдается система северо-западных разломов, контролировавших золото-серебряные жильные тела месторождения Высоковольтное.

Другой причиной формирования системы северо-западных рудовмещающих структур блока 7 может быть граничный разлом структурно-формационных зон, проходящий по югу Бельтау и ограничивающий его. Этот разлом разделяет Зерафшано – Туркестанскую структурно-формационную зону и Зерафшано – Алайскую, а точнее — Центрально – Кызылкумскую подзону (включающую Бельтау) и Зарафшанскую подзону (по А.К. Бухарину). Эта крупная региональная структура в период рудообразования находилась в активной фазе развития, о чём свидетельствуют сформированные северо-западные рудоконтролирующие структуры Аминзатау.

В районе Бельтау проявления золота формировались под влиянием различных структурных элементов земной коры. Анализ их положения 11 позволил выделить несколько групп: зона северо-восточного разлома, зона северо-западного разлома, зона искривления разлома, зона пересечения разломов, зона скалывания, зона субпараллельных разломов и зона клиновидных структур (*рис. 2*).

Во всех семи группах структурных позиций формировались проявления золота Бельтау. Широкий спектр структурных позиций отражает сложную и динамичную тектоническую обстановку, предшествовавшую процессам рудообразования, которая послужила причиной разнообразия тектонических элементов и их сочетаний, обеспечивших благоприятные условия для локализации минерализации.

Таким образом, на основании выше изложенного можно заключить:

1. Геодинамическая обстановка гор Бельтау (Даугызтауского рудного поля) периода рудообразования определялась воздействием внешних региональных тектонических сил.

2. Внутренняя геодинамическая обстановка гор Бельтау, соответственно Даугызтауского рудного поля, помимо воздействия внешних сил определялась их структурно-тектоническим строением, где главными тектоническими рудоконтролирующими структурами являются северо-восточные, широтные и субмеридиональные разломы и блоки, которые под воздействием внешних региональных тектонических сил активизировались, создавая структурные позиции, благоприятные для формирования золоторудных месторождений и размещения эндогенного золотого оруденения.

3. Разработанная методика моделирования напряженно-деформированного состояния структур рудного поля показала высокую эффективность в выявлении геодинамических механизмов, контролирующих размещение золоторудной минерализации.

4. Результаты исследования могут быть использованы для повышения точности прогнозно-поисковых работ и укрепления минерально-сырьевой базы Центральных Кызылкумов.

Библиографический список:

1. Некрасов Е.М. Поиск и разведка золоторудных месторождений на основе структурных предпосылок // Руды и металлы. – Москва: ФГУП ЦНИГРИ, 2019. – № 1. – С. 32-35.

2. Акбаров Х.А. Геолого-структурные условия размещения и прогнозирование оруденения на полиметаллических рудных полях и месторождениях Тянь-Шаня. – Т.: РИСО ТашГТУ, 2006. – 364 с.

3. Турапов М.К. и др. Экспериментальная тектоника в прикладной геологии. Геология и минеральные ресурсы. – № 5. – Ташкент: ГУ «ИМР», 2017. – С. 24-30.

4. Турапов М.К., Жанибеков Б.О., Колоскова С.М., Цой В.Д., Дулабова Н.Ю., Турсунметов А.Р. Прогнозно-поисковые золоторудные месторождения на закрытых территориях Центральных Кызылкумов. – Ташкент: «Fan Ziyosi», 2021. – 184 с.

5. Турапов М.К., Умматов Н.Ф., Кобилов З.М. Геодинамика рудообразования Даугызтауского рудного поля // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. XII Международная научно-практическая конференция. 11-14 апреля 2023 г. – Москва: ФГУП «ЦНИГРИ». – С. 477-479.

УДК 622.277.3.6:621.3

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.010

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ СУЛЬФИДНЫХ РУД ДЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НУКРАКОН И КОСМАНАЧИ

Санакулов К.,
председатель правления – генеральный директор АО «НГМК»,
д.т.н., профессор

Исмаилов Д.К.,
директор
ООО «O'zGEORANGMETLITI»

Maqolada O'zbekiston Respublikasi kumush sanoatining holati va rivojlanish istiqbollarini har tomonlama o'rganish, shu jumladan mineral-xomashyo bazasini tahlil qilish va kumush-oltin o'z ichiga olgan rudalarni qayta ishlashning samarali texnologiyalarini ishlab chiqish taqdim etilgan. Asosiy e'tibor Nukrakon va Kosmanachi konlariga qaratilgan. Konlarning geologik xususiyatlari, rudalarning mineralogik tarkibi va ularni qayta ishlashning texnologik jarayonlari batafsil tahlil qilingan. Rudalarning fizik-kimyoviy xossalari, shu jumladan sianlash kinetikasi, faollashtirilgan uglerodning sorbsiya sig'imi, gravitatsion va flotatsion boyitish samaradorligi o'rganildi. Qo'rg'oshin oksidi qo'shimchalarining sianlash jarayoniga ta'siri o'rganildi va texnologik jarayonlarning maqbul parametrlari aniqlangan. Rudalarning mineralogik tarkibining o'ziga xos xususiyatlarini hisobga olgan holda boyitish va sianlash jarayonlarini kuchaytirish bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqilgan. Taklif etilayotgan texnologik yechimlar ishlab chiqarish quvvatlarini modernizatsiya qilish, qayta ishlashning innovatsion usullarini joriy etish va ishlab chiqarish jarayonlarining atrof muxitga ekologik ta'sirini minimallashtirishni o'z ichiga oladi.

Kalit so'zlar: *kumush sanoati, mineral-xom ashyo bazasi, kumushni o'z ichiga olgan rudalarni qayta ishlash, boyitish usullari, sianlash, oksidlovchi yonish, nitrat kislotali yuvish, gidrometallurgik jarayonlar, ishlab chiqarishni modernizatsiya qilish, rudalarning fizik-kimyoviy xususiyatlari, gravitatsiyaviy boyitish, flotatsion boyitish, texnologik jarayonlar.*

В статье представлено комплексное исследование состояния и перспектив развития серебряной промышленности Республики Узбекистан, включающее анализ минерально-сырьевой базы и разработку эффективных технологий переработки серебро-золотосодержащих руд. Основное внимание уделено месторождениям Нукракон и Косманачи. Проведён детальный анализ геологических характеристик месторождений, минералогического состава руд и технологических процессов их переработки. Исследованы физико-химические свойства руд, включая кинетику цианирования, сорбционную ёмкость активированного угля, эффективность гравитационного и флотационного обогащения. Изучено влияние добавок оксида свинца на процесс цианирования и определены оптимальные параметры технологических процессов. Разработаны рекомендации по интенсификации процессов обогащения и цианирования с учётом специфики минералогического состава руд. Предложенные технологические решения включают модернизацию производственных мощностей, внедрение инновационных методов переработки и минимизацию экологического воздействия производственных процессов на окружающую среду.

Ключевые слова: *серебряная промышленность, минерально-сырьевая база, переработка серебросодержащих руд, методы обогащения, цианирование, окислительный обжиг, азотнокислотное выщелачивание, гидрометаллургические процессы, модернизация производства, физико-химические свойства руд, гравитационное обогащение, флотационное обогащение, технологические процессы.*

В современных условиях развития мировой экономики особое внимание уделяется минерально-сырьевому комплексу как одному из ключевых факторов экономического роста и стабильности государств. Республика Узбекистан, обладая значительным минерально-сырьевым потенциалом, занимает важное место на мировом рынке драгоценных металлов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексного анализа состояния и перспектив развития серебряной промышленности страны, которая обладает развитой сырьевой базой и уникальными геологическими особенностями месторождений.

В последние годы наблюдается тенденция увеличения доли развивающихся стран в мировой добыче серебра, что создаёт благоприятные условия для расширения присутствия Узбекистана на международном рынке драгоценных металлов. Целью исследования является анализ текущего состояния серебряной промышленности Узбекистана, оценка перспектив её развития и разработка рекомендаций по повышению эффективности переработки серебросодержащих руд.

Методологическая основа проведённых исследований затронула методы геологического анализа и системный подход к изучению технологических процессов переработки серебросодержащих руд. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для разработки стратегии развития серебряной промышленности Узбекистана и повышения её конкурентоспособности на международном уровне.

В статье представлен анализ состояния серебродобывающей промышленности Узбекистана, который обладает значительным потенциалом для увеличения объёмов добычи драгоценного металла. Страна располагает обширной сырьевой базой, сконцентрированной в ключевых регионах, таких как Кызылкумский и Чаткало-Кураминский, что позволяет ей занимать важное место на мировом рынке серебра. Особое внимание уделено основным месторождениям Нукракон и Косманачи.

Существующие предприятия, включая Навоийский и Алмалыкский горно-металлургические комбинаты, обеспечивают значительную

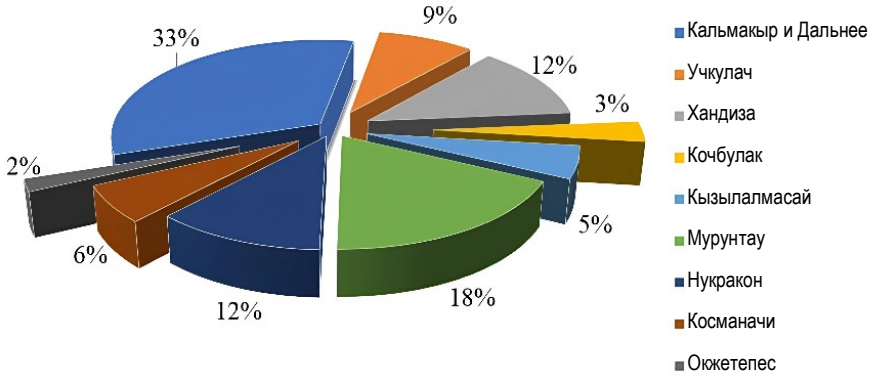


Рис. 1. Диаграмма распределения запасов серебра в Республике Узбекистан

долю добычи, однако существует необходимость в расширении и модернизации производственных мощностей. Всего на территории республики учтено 26 месторождений серебра, из которых 80,4 % составляют промышленные запасы [1]. Распределение запасов по основным месторождениям приведено на *рис. 1*.

Для реализации потенциала необходимо расширение и модернизация производственных мощностей, внедрение инновационных технологий переработки серебросодержащих руд, увеличение объёмов добычи за счёт освоения новых месторождений и привлечение иностранных инвестиций.

Проведённый анализ современных зарубежных исследований показал, что переработка упорных серебросодержащих концентратов требует инновационных решений для повышения эффективности и экологической безопасности. Выявлена необходимость развития новых технологий бактериального выщелачивания и более экологичных методов обжига, а также исследования комбинированных подходов [2-6].

Как известно, для разрушения кристаллической структуры минералов ассоциированных с тонкодисперсным золотом, наиболее перспективными являются методы окислительного обжига, сверхтонкого измельчения, автоклавного и кислотного выщелачивания. Наилучшие результаты для сульфидных концентратов с содержанием серебра, золота, меди и мышьяка показало азотнокислотное выщелачивание.

Также отмечено, что гидрометаллургический метод отличается высокой технологичностью и экологической безопасностью, а хлоридовозгонка является универсальным процессом для комплексной переработки концентратов. Кучное выщелачивание демонстрирует значительный потенциал для обогащения как природных, так и техногенных руд [7-9].

Таким образом, выбор оптимального метода переработки зависит от ряда факторов, включая минеральный состав руд и экономические показатели. Комбинированное применение различных технологий позволяет повысить эффективность извлечения серебра и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Проведённые исследования основываются на анализе технологических аспектов переработки серебро-золотосодержащих руд на месторождениях Нукракон, Косманачи в Узбекистане.

Основная проблема исследования заключается в необходимости разработки эффективных методов переработки руд с высоким содержанием драгоценных металлов, а также минимизации экологического воздействия производственных процессов на окружающую среду.

Методология сбора данных включает в себя изучение геологических характеристик месторождений, анализ технологических процессов на действующих предприятиях, проведение лабораторных испытаний по методам переработки, таким как сорбционное и интенсивное цианирование, отмывка и осаждение металлов цементацией и плавка.

Полученные данные анализируются с использованием методов технико-экономического анализа затрат и выгод различных технологий, лабораторных исследований физико-химических свойств руд и продуктов переработки, экологической оценки воздействия на основе расчёта выбросов и отходов, а также статистического анализа результатов экспериментов для определения оптимальных параметров процессов.

Выбор методологии обусловлен необходимостью обеспечения высокой эффективности извлечения драгоценных металлов и минимизации экологического воздействия производственных процессов на окружающую среду. В ходе исследования преодолеваются такие препятствия, как сложность переработки сульфидных руд, необходимость оптимизации технологических процессов и разработка природоохранных мероприятий.

Методология исследования базируется на анализе научных публикаций, данных геологических исследований, а также на результатах практических испытаний и экспериментов. Особое внимание уделяется изучению опыта зарубежных компаний в области переработки серебро-золотосодержащих руд и адаптации передовых технологий к условиям месторождений Узбекистана [2-6].

При исследовании сереброрудной минерализации в сульфидных рудах месторождений Нукракон и Косманачи применялись микроскопические и химические анализы. В результате было установлено, что минеральный состав руд данных месторождений имеет свои характерные особенности.

Представленные на *рис. 2* и *3* данные включают результаты обобщённого анализа химического состава проб на основе микроскопических исследований сульфидных руд месторождений Нукракон и Косманачи.

Выявлено, что в рудах месторождения Нукракон содержание кварца варьирует от 60 % до 70 %, а алюмосиликаты составляют от 35 % до 50 %. Карбонаты присутствуют в количестве от 1 % до 6 %, при этом уровень сульфатов достигает до 3 %, а содержание углистого вещества составляет 0,3 %. В составе руд обнаружены такие рудные минералы, как пирит, арсенопирит, халькопирит, блёклые руды, акантит, кераргирит, электрум, самородное серебро и золото. В пробе № 639 месторождения Нукракон также выявлены вторичные сульфиды – ковеллин и халькозин, при отсутствии галенита и сфалерита.

Месторождение Косманачи характеризуется более высоким содержанием кварца (60-70 %) и алюмосиликатов (30-35 %). Карбонаты в этих рудах встречаются в меньшем количестве (1-6 %), а содержание сульфатов составляет около 1 %.

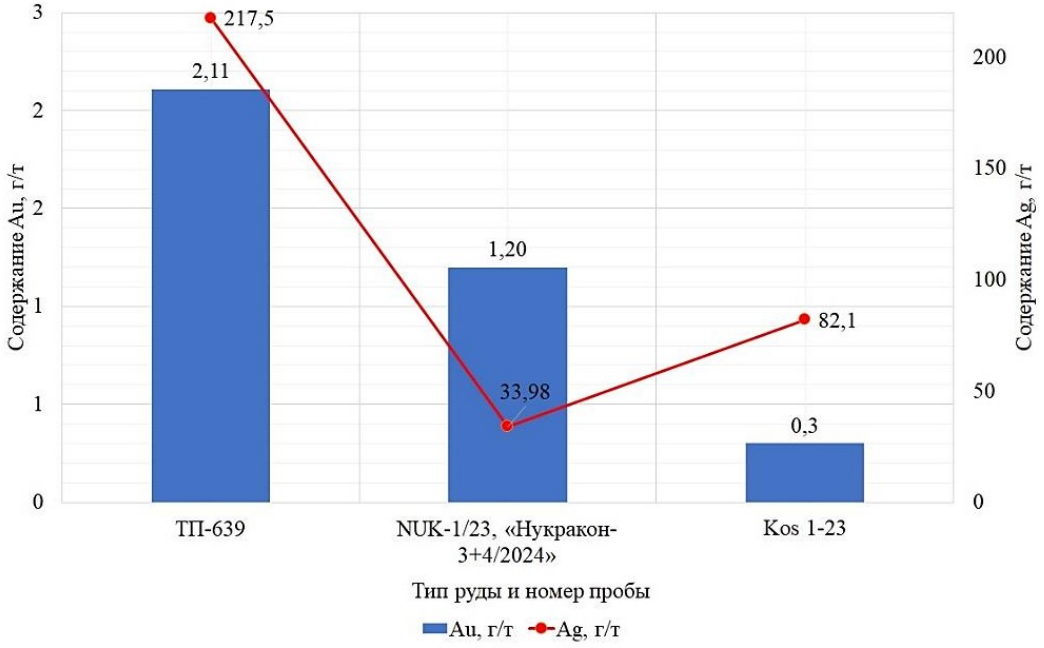


Рис. 2. Вариация содержаний полезных компонентов в пробах первичных руд месторождений Нукракон и Косманачи

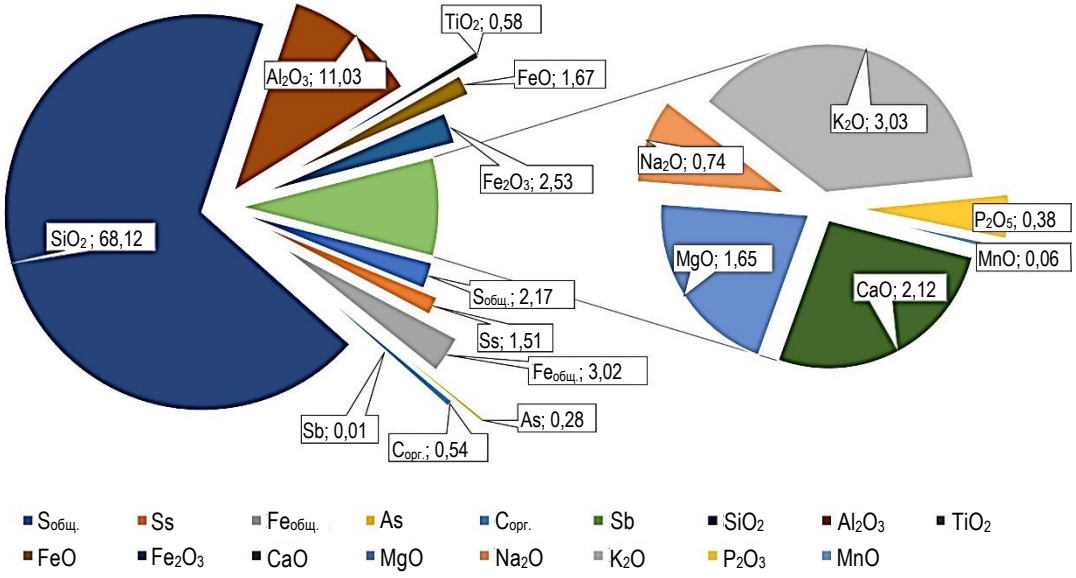


Рис. 3. Обобщенный химический состав проб изученных первичных руд месторождений Нукракон и Косманачи

Углистое вещество в рудах этого месторождения присутствует в количестве 1,1 %. В составе руд присутствуют те же рудные минералы, что и в Нукраконе, однако отмечается большее количество самородного серебра и золота в виде самостоятельных зёрен и открытых сростков.

Распределение серебра в рудах обоих месторождений имеет свои особенности. В Нукраконе около 80-90 % серебра находится в виде самостоятельных зёрен и открытых сростков, остальная часть – в сульфидах и минералах.

В Косманачи примерно 60-65 % серебра представлено в виде самостоятельных зёрен и открытых сростков, остальное – в сульфидах и минералах.

Таким образом, месторождения Нукракон и Косманачи имеют существенные различия в характере сереброрудной минерализации, что необходимо учитывать при разработке технологий добычи и переработки руд.

По результатам проведённого комплексного изучения вещественного состава и минералогических характеристик месторождений «Нукракон» и «Косманачи» можно отметить следующее:

– в первичных рудах обоих месторождений основными ценными компонентами являются серебро и золото;

– в минералогическом плане серебро встречается в формах самородного серебра, сульфосоли, такие как тетраэдрит и теннантит, а также акантит, пираргирит, миаргирит, гессит и кераргирит;

– значительная часть зёрен самородного серебра и других минералов серебра находится в виде самостоятельных зёрен либо в открытых сростках с другими минералами.

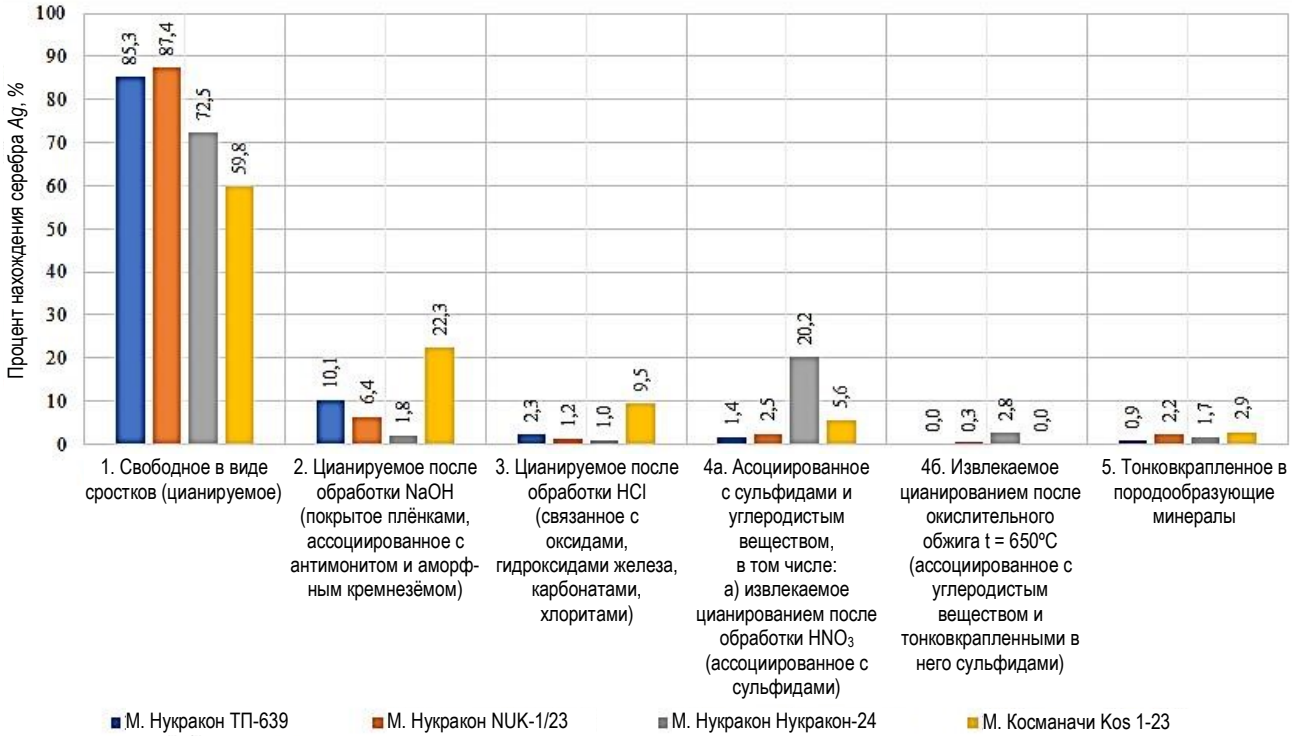


Рис. 4. Рациональный анализ форм нахождения серебра в сульфидных рудах в процентах

Таблица 1

Флотационное обогащение исходной сульфидной серебросодержащей руды по пробам месторождений Нукракон и Косманачи

Тип руды, проба	Содержание в исходной пробе, *г/т*		Содержание в хвостах флотации, *г/т*		Содержание во флотоконцентрате, *г/т*		Выход ФК, %	Извлечение во флотоконцентрат	
	Au	*Ag*	*Au*	*Ag*	*Au*	*Ag*		Au, %	Ag, %
Сульфидная руда Нукракон, ТП-639	2,11	217,35	0,79	33,5	12,34	1641,3	11,43	66,85	86,35
Сульфидная руда Нукракон, NUK-1/23	1,10	40,55	0,27	4,7	9,81	418,6	8,66	77,5	89,41
Сульфидная руда Нукракон, Нукракон-24	1,31	27,5	0,21	4,6	7,01	146,6	16,16	86,56	86,0
Сульфидная руда Косманачи, Kos 1-23	0,31	81,92	0,12	5,0	1,61	608,84	12,74	66,25	94,67

Месторождение Космоначи классифицируется как принадлежащее к убого сульфидному типу в рамках золотосеребряной формации. Химический состав характеризуется доминированием самородного серебра, составляющего 60 % от общего объёма, в то время как остальная часть серебра ассоциирована с минералами, такими как тетраэдрит, полибазит и пираргирит.

Морфология выделений серебра варьирует в диапазоне размеров от 0,5 до 0,75 *мм*, принимая комковидную, пластинчатую или дендритовидную формы.

Минералогический состав включает основные рудные минералы: пирит, арсенопирит, сфалерит и галенит, а также нерудные компоненты, представленные кварцем, углеродистыми соединениями, серицитом, хлоритом и карбонатами.

Проведены эксперименты по цианированию руд при различных условиях, таких как время выщелачивания, концентрация цианидов и температура. Особое внимание уделялось изучению кинетики цианирования, что позволило определить оптимальное время для растворения 90 % серебра.

Одновременно оценивалась эффективность гравитационного обогащения с использованием различных методик, таких как отсадка и центробежная концентрация.

Исследования по флотационному обогащению включали определение оптимальных условий, таких как выбор реагентов, интенсивность перемешивания и продолжительность процесса.

Изучена сорбционная ёмкость активированного угля для серебра и золота при различных условиях. Проводились эксперименты по противоточной декантации для отделения растворенных металлов от твердого остатка. Исследовался процесс цементации цинковой пылью для осаждения серебра из растворов, при этом определялись оптимальные условия проведения данного процесса.

Для интенсификации процесса цианирования рассмотрены добавки оксида свинца, где установлено положительное влияние оксида свинца на извлечение серебра.

Кроме того, исследованы методы подготовки флотоконцентратов к цианированию, включая горячую обработку кислотами.

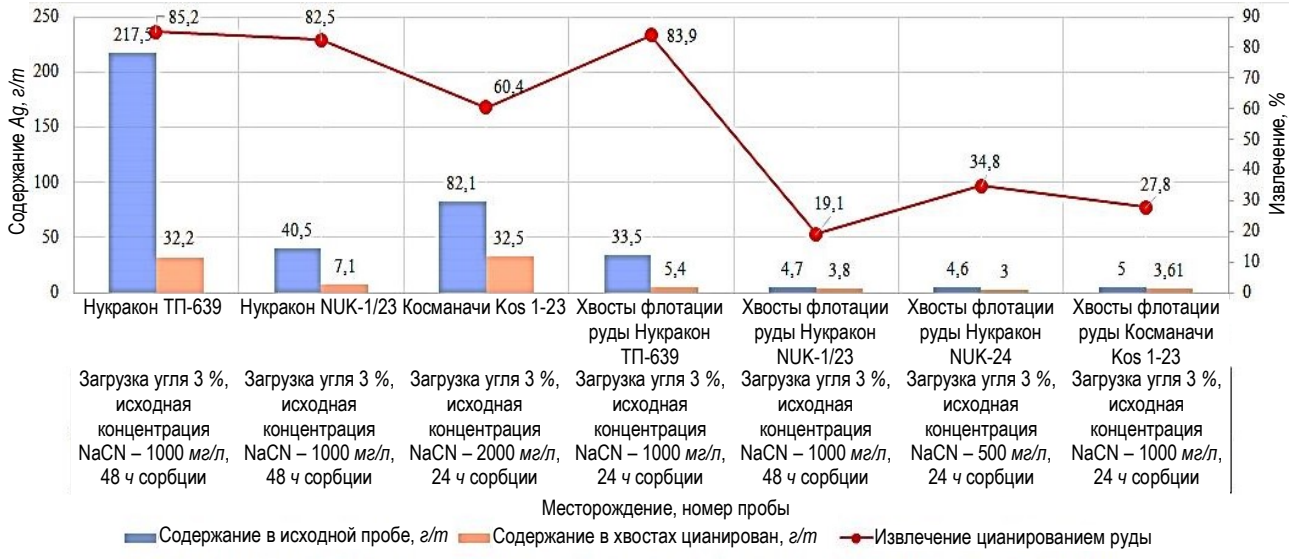


Рис. 5. Сорбционное цианирование исходной сульфидной руды и хвостов флотации

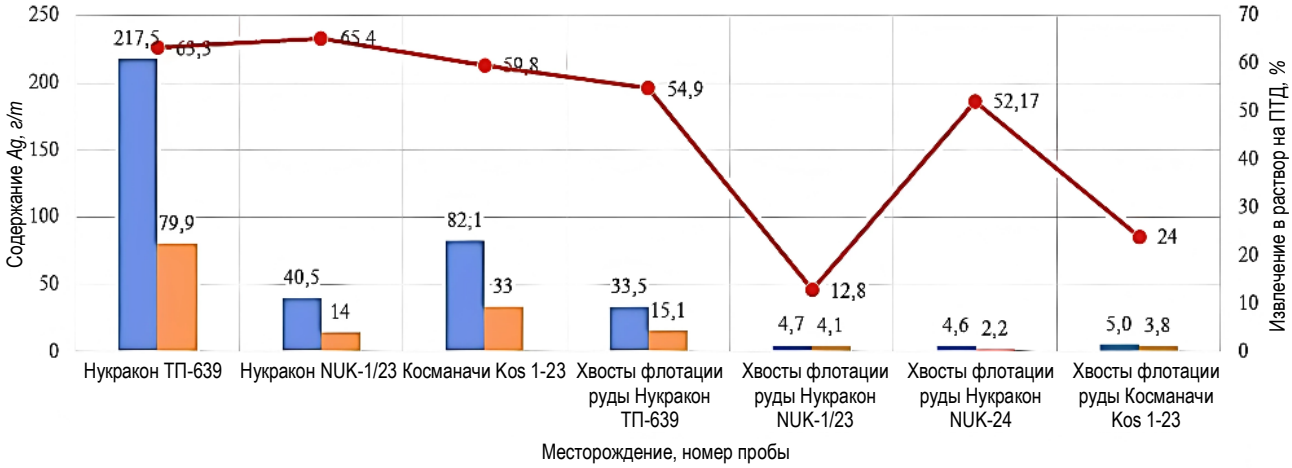


Рис. 6. Результаты противоточно-декантационной отмывки процианированной пульпы исходной руды и хвостов флотации (Содержание в жидкой фазе варьируется в диапазоне на ПТД-1 от 0,28 до 4,3 мг/л, на ПТД-5 от 0,1 до 0,54 мг/л)

Особое внимание уделено изучению процессов обжига флотоконцентратов и кеков их цианидного выщелачивания.

Определена оптимальная температура обжига, обеспечивающая максимальное извлечение серебра [10, 11].

Комплекс технологических исследований сульфидных руд предусматривал изучение показателей и режимов переработки в следующих основных направлениях:

– формы нахождения серебра и золота в руде и характер их ассоциации (*рис. 4*);

– флотационное обогащение исходных руд (*табл. 1*);

– сорбционное цианирование исходных руд и хвостов флотации в различных режимах (*рис. 5*);

– цианирование и противоточно-декантационная отмывка пульп исходной руды и хвостов флотации (*рис. 6*);

– рациональный анализ форм нахождения серебра во флотоконцентратах (*рис. 7*);

– сорбционное цианирование флотоконцентратов (*рис. 8*);

– рациональный анализ форм нахождения золота и серебра в хвостах цианирования флотоконцентратов (*рис. 9*).

Значительный объем исследований проведён в направлении углубленного изучения флотоконцетратов обогащения сульфидных руд с разработкой технологии комплексного извлечения серебра, с определением оптимальных режимов ведения технологических операций.

Учитывая большой объем результатов исследований обобщены и консолидированы данные о технологических свойствах руд и продуктах их переработки, достаточные для обоснования технологических решений по схеме переработки серебросодержащих руд рассматриваемых месторождений.

Рациональный анализ форм нахождения серебра во флотоконцентратах сульфидной руды по месторождениям Нукракон и Косманачи позволил выделить закономерные соотношения (*рис. 8*).

При переработке серебросодержащей руды важно учитывать, что большая часть серебра находится в цианируемых формах, преимущественно в виде сульфидов, таких как акантит и аргентит, а также в самородном состоянии. Значительная доля металла ассоциирована с углеродистыми веществами и породообразующими минералами. Исследования показали, что прямое цианирование

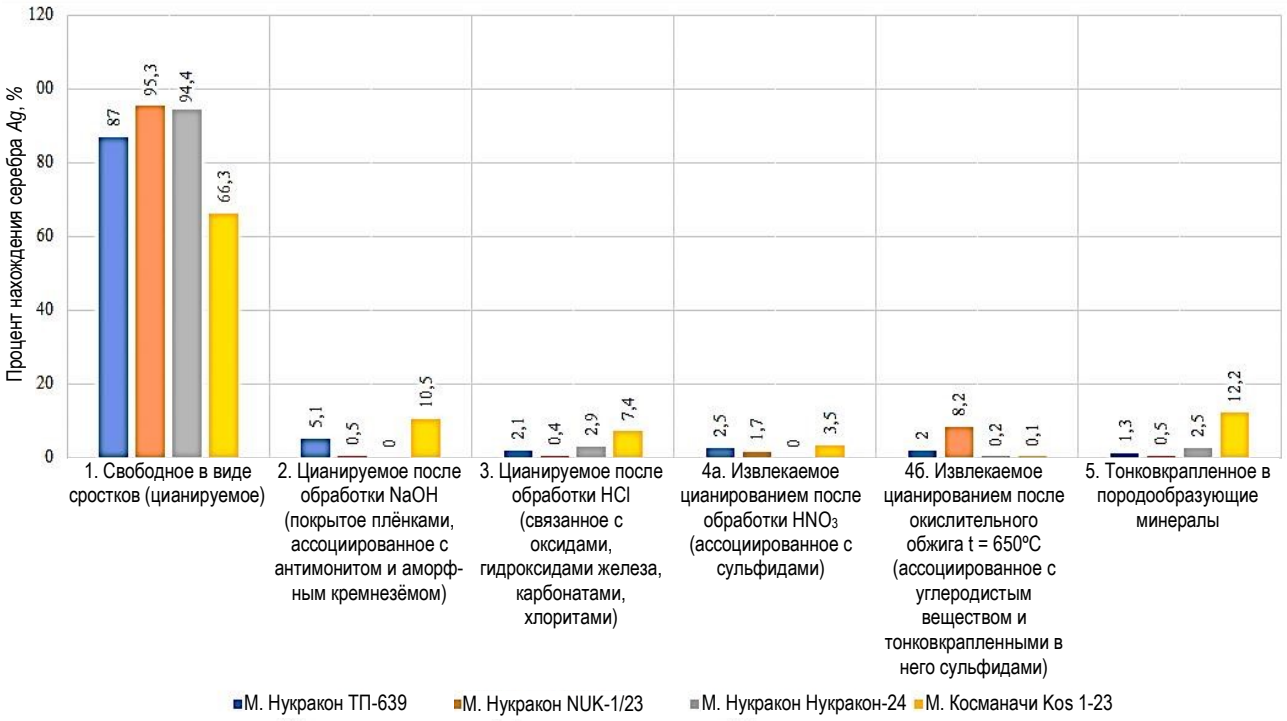


Рис. 7. Рациональный анализ форм нахождения серебра во флотоконцентратах сульфидной руды

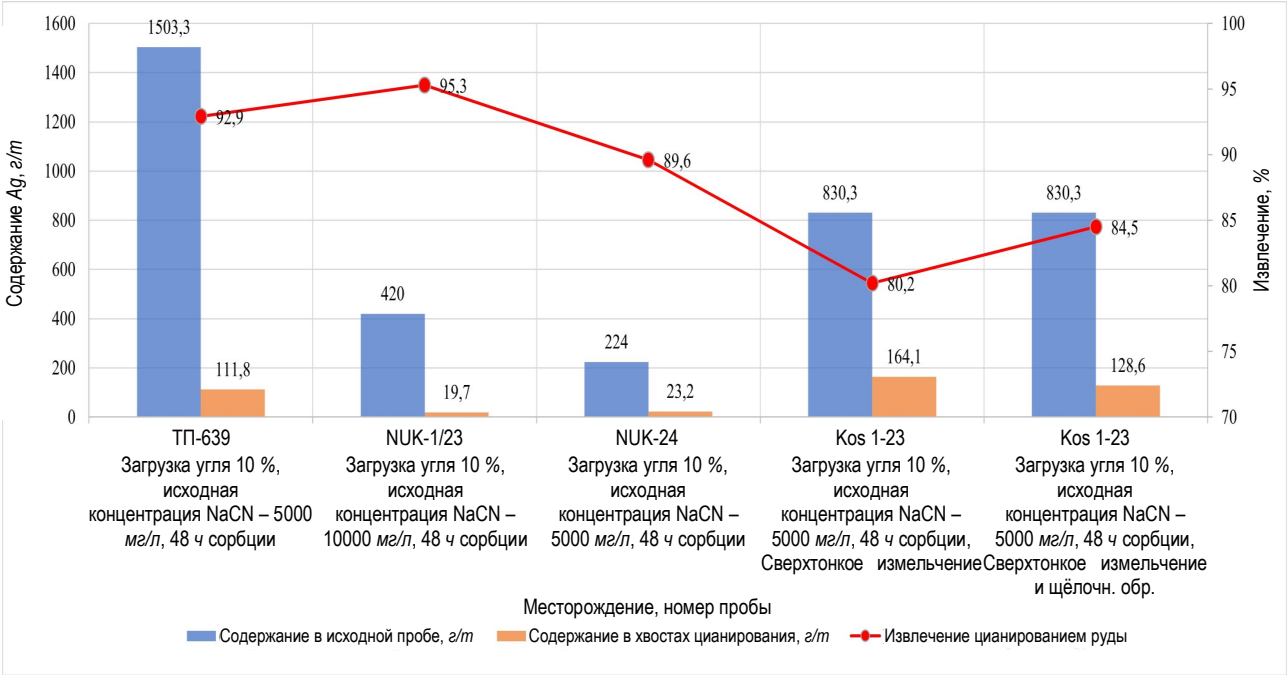


Рис. 8. Сорбционное цианирование флотоконцентратов

позволяет извлечь около 82-85 % серебра, оставляя в хвостах от 7 до 30 *граммов* металла на *тонну*.

Флотационное обогащение более эффективно, так как позволяет извлечь до 86-94 % серебра, при этом содержание в хвостах составляет 4,5-5,5 *г/т*. Дальнейшая переработка хвостов флотации может осуществляться через сорбционное цианирование, которое снижает содержание серебра до 3,6-3,8 *г/т*, или через цианирование с противоточно-декантационной отмывкой, оставляющей в хвостах 2,2-4,1 *грамма* серебра на *тонну*.

Для улучшения процесса цианирования исследовались различные добавки. Добавление оксида свинца в количестве 2 *кг/т* позволило повысить извлечение серебра с 79 % до 88 %, так как свинец

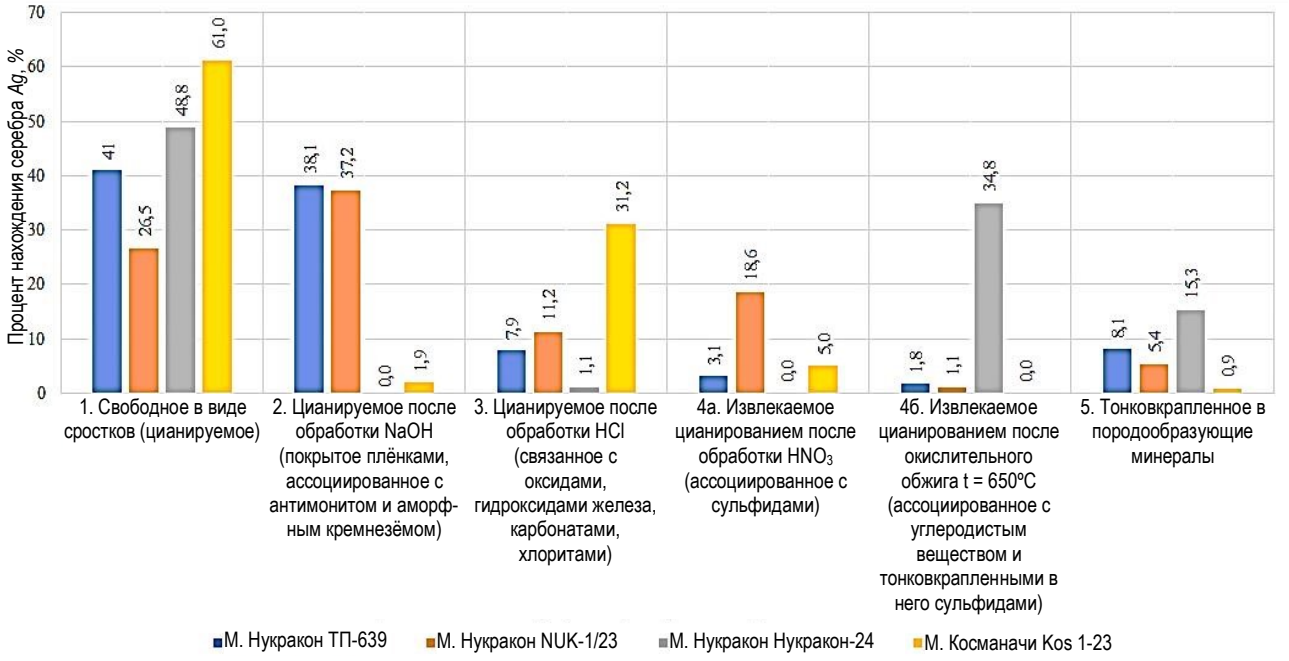


Рис. 9. Рациональный анализ форм нахождения золота и серебра в хвостах цианирования флотоконцентратов

связывает серу в прочный сульфид, который выпадает в осадок. Окислители, такие как кислород и перекись водорода, не оказали существенного влияния на процесс. Оптимальные условия цианирования включают концентрацию цианистого натрия в 5 *г/л* и продолжительностью выщелачивания не менее 48 *ч*.

Особое внимание уделялось хлорирующему обжигу флотоконцентратов при котором выявлено, что оптимальная температура для эффективного вскрытия серебра составляет 450ºC. При этой температуре достигается извлечение серебра на уровне 81-88 %. Более высокие температуры, такие как 850ºC, дают лишь 37 % извлечения, а более низкие, например 650ºC, обеспечивают 49 % извлечния.

Была исследована схема двухстадиального цианирования с промежуточным обжигом, где кеки цианирования подвергались дополнительному обжигу и последующему сорбционному цианированию. Эта технология показала высокую эффективность, обеспечивая извлечение серебра до 95,7 % при содержании в хвостах всего 9,56 *г/т*.

Выводы.

Проведённые исследования показали, что существующие горнометаллургические предприятия нуждаются в модернизации и внедрении инновационных технологий переработки серебросодержащих руд. Особое внимание необходимо уделить экологически безопасным методам обогащения и цианирования: окислительному обжигу, азотнокислотному выщелачиванию и гидрометаллургическим процессам. Анализ месторождений Нукракон и Косманачи выявил их специфические особенности, установлено высокое содержание серебра в рудах, причём значительная часть серебра представлена в самородной форме и в виде различных сульфидов.

Химический состав руд включает кварц, алюмосиликаты, карбонаты и сульфаты. Разработанная методология исследования объединила геологические, технологические и экономические аспекты. Были определены оптимальные параметры процессов для повышения эффективности переработки руд с учётом минимизации экологического воздействия на окружающую среду.

Эксперименты по цианированию руд показали эффективность различных условий: времени выщелачивания, концентрации цианидов и температуры. Особое внимание уделялось добавкам, таким как оксид свинца, который значительно повысил эффективность извлечения серебра до 88 %.

Исследования флотационного обогащения показали, что этот метод позволяет извлечь до 94 % серебра, превосходя показатели прямого цианирования (82-85 %). Разработана технология двухстадиального цианирования с промежуточным обжигом, обеспечивающая максимальное извлечение серебра – до 95,7 %. Практическое значение исследования заключается в возможности использования полученных результатов для формирования стратегии развития серебряной промышленности Узбекистана. Это позволит повысить конкурентоспособность отрасли и укрепить позиции страны на мировом рынке драгоценных металлов.

Библиографический список:

1. Голованов И.М. и др. Рудные месторождения Узбекистана. – Ташкент: Институт минеральных ресурсов, 2002. – 660 с.

2. Лодейщиков В.В., Игнатьева К.Д. Рациональное использование серебросодержащих руд. – М.: Недра, 1973. – 224 с.

3. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. – Иркутск, 1999.- 452 с.

4. Босиков И.И., Кожиев Х.Х., Силаев И.В., Ревазов В.Ч. Комплексная оценка технологических схем переработки серебросодержащих первичных руд рубинового месторождения // М.: Горный информационно-аналитический бюллетень, 2023. – № 5-1. – С. 36–49. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_36.

5. Костикова О.С. Оптимизация процессов обогащения серебро-полиметаллических руд для снижения вредного влияния шламов // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), 2015. – № 5 (14). – С. 14-18.

6. Евдокимов А.В., Дементьева Н.А., Коблов А.Ю. Переработка золото-серебросодержащей полиметаллической руды // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2020. – Вып. 1. – С. 228-234. ISSN 2218-5194.

7. Ахмаджанов У.М., Абдурахмонов С.А., Бабаев Ш., Эрназаров М. Извлечение благородных металлов из серебросодержащих руд методом кучного выщелачивания // Навои: Горный вестник Узбекистана, 2009. – № 4. – С. 80.

8. Эзозхонов А.Н. и др. Исследование технологии переработки серебросодержащих руд с кучным выщелачиванием // Universum: технические науки: электрон. научн. Журн, 2023. – № 10(115). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16172.

9. Эрназаров М., Самадов А.У., Холикулов Д.Б. Исследования процесса цианирования золото-серебросодержащих руд // Навои: Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2009. – № 1 (36). – С. 79-80.

10. Санакулов К.С., Эргашев У.А., Ткаченко Е.С. Усовершенствование схемы рудоподготовки на Гидрометаллургическом заводе № 2 // Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2019. – № 2 (77). – С. 65-67.

11. Санакулов К.С., Эргашев У.А., Зимина А.А., Поперечникова О.Ю. Применение комбинированных технологий для рациональной переработки особо упорных золотосульфидных руд. – М.: Горный журнал, 2023. – № 10. – С. 4-8.

«GORNIY VESTNIK UZBEKISTANA», 2025. No. 3 (102) pp. 45-52

OPTIMIZATION OF PROCESSING TECHNOLOGY FOR SILVER-BEARING SULFIDE ORES FROM THE NUKRAKON AND KOSMANACHI DEPOSITS

[1]***Sanakulov K.,*** *Chairman of the Board – General Director, Doctor of Technical Sciences, Professor.*
[2]***Ismailov D.K.,*** *Director.*

[1]***JSC «Navoi Mining and Metallurgical Combine». Navoi, Uzbekistan.***
[2]***LLC «O'zGEORANGMETLITI». Tashkent, Uzbekistan.***

This article presents a comprehensive study of the current state and development prospects of the silver industry in the Republic of Uzbekistan, including an analysis of the mineral resource base and the development of efficient technologies for processing silver- and gold-bearing ores. The primary focus is on the Nukrakon and Kosmanachi deposits. A detailed analysis of the geological characteristics of the deposits, the mineralogical composition of the ores, and the technological processes for their processing has been carried out. The physical and chemical properties of the ores have been studied, including cyanidation kinetics, adsorption capacity of activated carbon, and the efficiency of gravity and flotation beneficiation. The effect of lead oxide additives on the cyanidation *process has been investigated, and optimal parameters of technological processes have been identified. Recommendations have been developed to intensify beneficiation and cyanidation processes, taking into account the specific mineralogical composition of the ores. The proposed technological solutions include modernization of production capacities, implementation of innovative processing methods, and minimization of the environmental impact of production processes.*

Keywords: *silver industry, mineral resource base, processing of silver-bearing ores, beneficiation methods, cyanidation, oxidative roasting, nitric acid leaching, hydrometallurgical processes, production modernization, physicochemical properties of ores, gravity beneficiation, flotation beneficiation, technological processes.*

Bibliography:

1. Golovanov I.M. et al. Ore Deposits of Uzbekistan. – Tashkent: Institute of Mineral Resources, 2002. – 660 p.

2. Lodeyshchikov V.V., Ignatyeva K.D. Rational Use of Silver-Bearing Ores. – M.: Nedra, 1973. – 224 p.

3. Lodeyshchikov V.V. Technology for Extraction of Gold and Silver from Refractory Ores. – Irkutsk, 1999. – 452 p.

4. Bosikov I.I., Kozhiev Kh.Kh., Silaev I.V., Revazov V.Ch. Comprehensive Assessment of Technological Schemes for Processing Primary Silver Ores of the Rubin Deposit // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. Moskov, 2023. – No. 5-1, pp. 36–49. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_36.

5. Kostikova O.S. Optimization of Beneficiation Processes for Silver-Polymetallic Ores to Reduce the Harmful Impact of Sludges // Eurasian Union of Scientists (EUS), 2015. – No. 5 (14), pp. 14-18.

6. Evdokimov A.V., Dementyeva N.A., Koblov A.Yu. Processing of Gold- and Silver-Bearing Polymetallic Ore // Bulletin of Tula State University. Nauki o Zemle, 2020. – Issue 1, pp. 228-234. ISSN 2218-5194.

7. Akhmadzhanov U.M., Abdurakhmonov S.A., Babaev Sh., Ernazarov M. Extraction of Precious Metals from Silver-Bearing Ores by Heap Leaching Method // Gornyy vestnik Uzbekistana. – Navoi, 2009. – No. 4. (39). – 80 p.

8. Ezozkhonov A.N. et al. Research on the Technology of Processing Silver-Bearing Ores Using Heap Leaching // Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal, 2023. – No. 10(115). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16172.

9. Ernazarov M., Samadov A.U., Kholikulov D.B. Studies of the Cyanidation Process of Gold- and Silver-Bearing Ores // Mining Bulletin of Uzbekistan. – Navoi, 2009. – No. 1 (36), pp. 79-80.

10. Sanakulov K.S., Ergashev U.A., Tkachenko E.S. Improvement of Ore Preparation Scheme at Hydrometallurgical Plant No. 2 // Gornyy vestnik Uzbekistana. – Navoi, 2019. – No. 2 (77), pp. 65-67.

11. Sanakulov K.S., Ergashev U.A., Zimina A.A., Poperechnikova O.Yu. Application of Combined Technologies for Rational Processing of Especially Refractory Gold-Sulfide Ores. – Moscow: Gornyy zhurnal, 2023. – No. 10, pp. 4-8.

УДК 622.765:681.5

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.019

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ

Кадиров Ё.Б.,
заведующий кафедрой
«Автоматизация и управление»
НГГТУ, PhD, доцент

Азизов С.М.,
инженер-программист
ЦЛ КИП и А управления АП
АО «НГМК»

Ushbu tadqiqot ishida rudalarni boyitish jarayonida flotatsiya jarayonining texnologik parametrlari nazoratini oshirish, foydali meniral-larni ma'dandan olish, energiya va resurs samaradorligini yaxshilash muammolari ko'rib chiqildi. Flotatsiya texnologik jarayonida rea-gentlarning optimal dozasi ta'minlash boyitish bosqichining muhim jihat ekanligi aniqlandi. Reagentlarni optimal tarzda berish va sama-rali mineral chiqarishni nazorat qilish uchun K-means++ matematik modellashtirish usuli qo'llanildi, bu usul minerallar bilan qoplangan ko'pikning to'yinganligini aniqlashga yordam beradi. Matematik modellashtirish natijalari asosida minerallarni olishni yaxshilash va flotatsiya jarayonini boshqarish tizimini optimallashtirish maqsadida reagent dozasi bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqildi.

Kalit so'zlar: *flotatsiya jarayoni, jarayonni optimallashtirish, matematik modellashtirish, reaktiv dozalash, jarayonni boshqarish tizimi, k-means++.*

В данной исследовательской работе рассмотрены проблемы контроля технологических параметров процесса флота-ции при обогащении руд для увеличения извлечения, а также повышения энерго- и ресурсной эффективности. Установлено, что в технологическом процессе флотации оптимальное дозирование реагентов является важным аспектом на данной стадии обогащения. Для оптимальной подачи реагентов и контроля эффективного извлечения был использован метод математического моделирования K-means++, который определяет насыщенность пены минералами. По результатам математического моделирования разработаны рекомендации по дозированию реагентов с целью улучшения извлечения минералов и системы управления процессом флотации.

Ключевые слова: *процесс флотации, оптимизация процесса, математическое моделирование, дозирование реагентов, система управления процессом, K-means++.*

Процесс флотации, являясь основным методом обогащения руд, играет решающую роль в извлечении полезного продукта из пульпы. Однако эффективность этого процесса зависит от множества факторов, таких как состав руды, физико-химические свойства минералов, а также от точности дозировки реагентов. Визуально эффективность дозировки можно определить по пенному слою. Для того чтобы определить оптимальность дозировки флотатор оценивает размер пузырьков, их цвет и прозрачность, стабильность пены. Рассмотрим процесс флотации как объект управления (*рис. 1*), основными факторами, которые влияют на качество пены, которая в свою очередь увеличивает извлечение полезного продукта – это концентрация активаторов, коллекторов и пеногасителей.

Своевременная регулирования данных параметров увеличивает процент извлечения полезного продукта и снижает расход электроэнергия, так как флотаконцентрат не отправляется на доизвлечение. Также важен экологический аспект в примере воды процесса флотации. При оптимальном управление процессом снижается потребления воды.

Автоматизация процесса флотации является одной из наиболее сложных задач. В процессе флотации происходит множество химических процессов таких как массообменный, теплообменный и электростатический.

Как показано на структурной схеме (*рис.2*) процесс флотации начинается с подачи пульпы на рабочую камеру флотомашины,

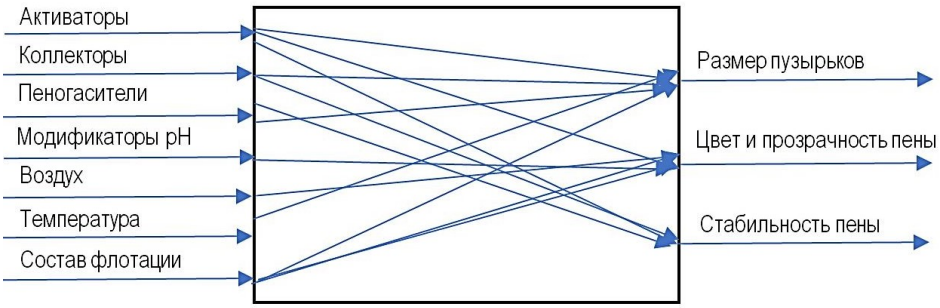


Рис. 1. Обобщенная схема факторов, влияющих на качество пены в процессе флотации

после это подается воздух через аэрационную систему и создается турбулентный поток с помощью, которого минералы и пузырики перемешиваются. Добавляется вода и реагенты, которые изменяют гидрофобные свойства минералов.

Минералы, прилипшие к пузырькам, образуют пену. Пена постепенно отправляется в паросборник, а нефлотационные минералы отправляются в хвосты флотации.

Неправильное управление процессом может привести к низкому извлечению минералов, повышенному потреблению реагентов и энергии, что, в свою очередь, снижает экономическую эффективность всего процесса.

Проблематика и цели исследования.

Проблема оптимизации дозировки реагентов на стадии флотации состоит в том, что традиционные методы управления процессом не всегда могут учесть все переменные, влияющие на эффективность извлечения минералов. К тому же изменение параметров флотации, таких как скорость подачи воздуха или температура, также может существенно повлиять на результаты обогащения.

В связи с этим, целью данного исследования является разработка и внедрение метода математического моделирования для оптимизации дозировки реагентов с целью повышения извлечения минералов и энергоэффективности процесса флотации.

Основными задачами исследования являются:

Разработка математической модели для оптимизации дозировки реагентов с использованием алгоритма K-means++;

Оценка влияния дозировки реагентов на эффективность флотации;

Разработка рекомендаций по внедрению автоматизированных систем управления технологическими параметрами.

Теоретическая основа.

Процесс флотации представляет собой сложную физико-химическую систему, в которой химические реагенты взаимодействуют с минералами в процессе их отделения от пустых пород. Важно, чтобы дозировка реагентов была оптимальной для каждого типа руды, что требует гибкой настройки технологических параметров.

Для решения задачи оптимизации дозировки реагентов в этом контексте был выбран метод K-means++, который является улучшенной версией алгоритма K-means.

Метод K-means – это алгоритм кластеризации, используемый для разделения данных на несколько групп (кластеров) на основе сходства объектов в данных. Алгоритм минимизирует среднеквадратичное отклонение внутри каждого кластера. Математически, его можно описать следующим образом:

Основные шаги алгоритма K–means:

Инициализация центроидов кластеров: сначала выбираются k случайных объектов из исходных данных или генерируются случайные точки в пространстве признаков в качестве начальных центроидов кластеров. Центроид кластера – это его среднее значение, т.е. точка, минимизирующая сумму расстояний до всех объектов в кластере.

Присвоение объектов кластерам: для каждого объекта x_i из исходных данных вычисляется расстояние до каждого из k центроидов (обычно используется евклидово расстояние). Объект присваивается тому кластеру, чей центроид находится ближе всего.

Математически:

$$C_i = arg_{c_j \in \{C_1, C_2, \ldots, C_k\}} min \left\| x_i - \mu_j \right\|^2 \quad (1)$$

где x_i – объект;

μ_j -- – -координаты центроида j-го кластера;

C_i – кластер, к которому принадлежит объект x_i;

$\|\cdot\|^2$- – евклидова норма (квадрат расстояния).

Обновление центроидов: после того как все объекты распределены по кластерам, вычисляется новый центроид для каждого

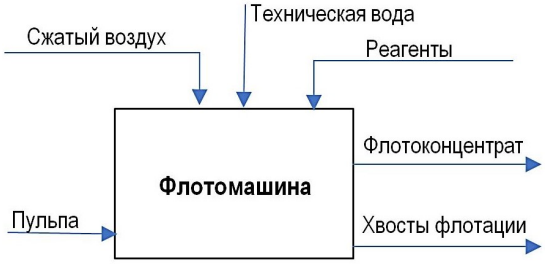


Рис. 2. Общая структурная схема процесса флотации

кластера, как среднее значение всех объектов, принадлежащих этому кластеру:

$$\mu_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{x_i \in C_j} x_i \quad (2)$$

где μ_j – новый центроид для кластера j;

$|C_j|$ – количество объектов в кластере C_j;

x_i – объекты, принадлежащие кластеру C_j;

Проверка сходимости: Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока центроиды не перестанут изменяться или изменения станут незначительными (например, по какой-то заранее заданной метрике сходимости).

Математическая цель алгоритма:

Цель метода K-средних – минимизация функции стоимости (или потерь), которая измеряет сумму квадратов расстояний между каждым объектом и его ближайшим центроидом:

$$J(k) = \sum_{j=1}^{k} \sum_{x_i \in C_j} \left\| x_i - \mu_j \right\|^2 \quad (3)$$

где $J(k)$ – целевая функция,

C_j – кластер j,

μ_j – центроид кластера j,

x_i – объект в кластере C_j.

Алгоритм минимизирует $J(k)$, что означает, что объекты внутри каждого кластера становятся как можно более похожими друг на друга, а кластеры – более отделёнными. В применении к процессу флотации, метод K-means++ используется для выделения кластеров, представляющих различные состояния системы флотации (например, различные режимы дозировки реагентов или состояния насыщенности пены).

Процесс флотации включает несколько ключевых стадий:

– подготовка минералов (меление, измельчение);

– добавление химических реагентов, которые изменяют поверхностные свойства минералов;

– аэрация и образование пены;

– сбор пены с минералами.

Эффективность каждого из этих этапов зависит от правильного сочетания дозировки реагентов и условий, при которых происходит флотация.

Методы исследования.

Исследование проводилось с использованием математического моделирования и метода кластеризации данных на основе алгоритма K-means++. Для этого использовались следующие этапы:

Сбор и обработка данных:

На первом этапе было собрано большое количество данных о технологическом процессе флотации, включая параметры дозировки реагентов, химический состав руды, характеристики минералов, а также различные операционные параметры (например, скорость подачи воздуха, температура и другие).

Эти данные являются основой для дальнейшего моделирования.

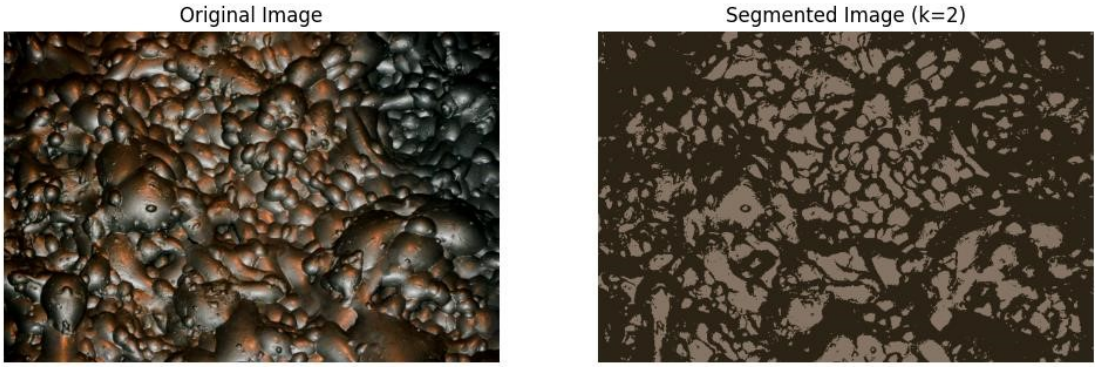


Рис. 3. Использование алгоритма K-mean++ в процессе флотации, до (Original image) и после (Segmented Image) сегментации изображения

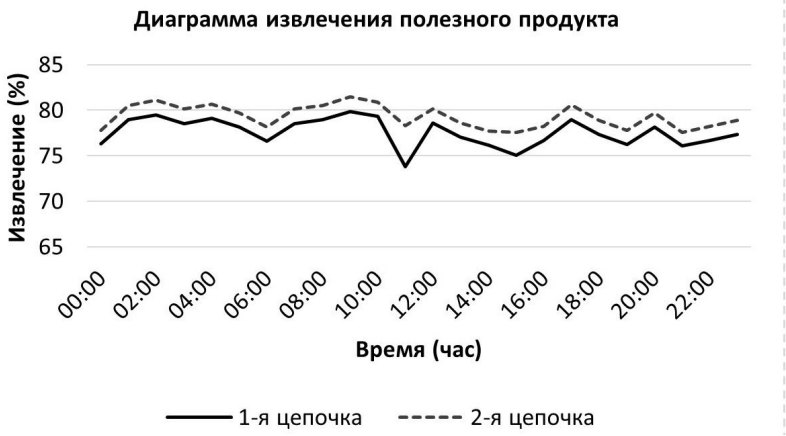


Рис. 4. Лабораторные результаты извлечения в 2-цепочках флотации

Применение алгоритма K-means++: Алгоритм K-means++ использовался для сегментации изображения получаемый в реальном времени. Изображение делилось на различные кластеры основываясь на схожести пикселей. После кластеризации алгоритм воссоздает основываясь на сегментации (*рис. 3*).

Кластеризация и оптимизация дозировки: для каждого полученного кластера было определено оптимальное дозирование реагентов с учетом всех факторов, влияющих на процесс флотации. Это позволило адаптировать параметры процесса к изменяющимся условиям и улучшить эффективность извлечения.

Разработка рекомендаций:

На основе результатов математического моделирования были сформулированы рекомендации по дозировке реагентов для различных типов руды и условий флотации.

Также были предложены пути оптимизации системы управления процессом с использованием автоматизированных систем контроля.

Результаты и обсуждение.

Результаты исследования показали, что использование метода K-means++ позволяет значительно улучшить показатели эффективности процесса флотации.

Кластеризация данных позволила выделить несколько устойчивых режимов работы процесса, в которых дозировка реагентов была оптимальной для извлечения минералов с минимальными энергетическими затратами.

Основные выводы из результатов моделирования.

Увеличение извлечения минералов: В некоторых кластерах оптимизация дозировки реагентов позволила значительно повысить извлечение полезных ископаемых.

Это связано с тем, что правильная настройка дозировки позволяет улучшить качество пены и повысить эффективность отделения минералов от пустых пород. На графике (*рис. 4*) показано результаты лабораторных замеров. 1-я цепочка флотации управлялось флотатором без рекомендаций которое формировал алгоритм K-means++.

Для подачи реагентов для 2-й цепочки, флотатор использовал рекомендации, которые генерировал алгоритм K-mean++. Сравнивая результаты, 2-я цепочка извлекло на 2 % больше, полезного продукта чем 1-я цепочка флотации.

Снижение энергозатрат:

В некоторых случаях оптимизация дозировки реагентов позволила снизить потребление энергии за счет уменьшения количества избыточных химических веществ и оптимизации аэрации, что также сказалось на стоимости процесса.

Гибкость системы управления:

Метод K-means++ позволил выделить разные режимы работы процесса, что дало возможность точнее настроить систему управления в зависимости от параметров руды и других внешних факторов.

Разработанная модель прогнозирует:

Автоматизацию дозирования реагентов:

Рекомендуется внедрение систем автоматического контроля дозировки реагентов на основе алгоритма K-means++. Это позволит не только повысить стабильность процесса, но и снизить риски ошибок при ручной настройке параметров.

Интеграцию с системой мониторинга:

Для эффективного контроля параметров процесса флотации важно интегрировать модель K-means++ с системами мониторинга, которые обеспечат сбор данных в реальном времени и быструю адаптацию системы управления.

Использование в реальных условиях:

Применение метода K-means++ в реальных условиях производства требует учета специфики каждого предприятия, поэтому необходимо провести дополнительные исследования для настройки системы под конкретные характеристики руды.

Заключение. Применение метода K-means++ при определении содержания полезного минерала по цвету флотоконцентрата для оптимизации дозировки реагентов в процессе флотации показывает свою высокую эффективность.

Внедрение автоматизированных систем управления, основанных на результатах математического моделирования, может значительно повысить производительность флотационных установок и снизить эксплуатационные расходы, что в конечном итоге приведёт к улучшению экономических показателей обогатительных фабрик.

Библиографический список:

1. Селевцов Л.И. Автоматизация технологических процессов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2014. – 352 с.

2. Шилин А.Н., Сницарук Д.Г. Система технического зрения робота для контроля геометрических параметров обечаек // Управление, контроль, диагностика. – № 8. – Волгоград: Приборы и системы, 2019. – С. 36-43.

3. Li J., Cao B., Zhu H. and Ni F. Flotation froth image texture extraction method based on deterministic tourist walks – Multimedia Tools Appl., vol. 76, no. 13, pp. 15123-15136, 2017.

4. Ca D., He X. and Han J. Document Clustering Using Locality Preserving Indexing. IEEE Trans. Knowl. Data Eng., 2005, pp. 1624-1637.

5. Wu J., Lin Z. and Zha H. Essential Tensor Learning for Multi-View Spectral Clustering. IEEE Trans. Image Process, 2019, pp. 5910-5922.

«GORNIY VESTNIK UZBEKISTANA», 2025. No. 3 (102) pp. 53-56

OPTIMIZATION OF CONTROL OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE FLOTATION PROCESS

[1]***Kadirov Y.B.,*** *Associate Professor, Head of the Department of Automation and Control, PhD.*
[2]***Azizov S.M.,*** *Software engineer at the central laboratory of instrumentation and automation.*

[1]Navoi State University of Mining and Technologies. Navoi, Uzbekistan.
[2]Joint-stock company «Navoi Mining and Metallurgical Combine». Navoi, Uzbekistan.

In this research paper, the problems of controlling the technological parameters of the flotation process during ore processing were considered to increase extraction, energy and resource efficiency. It has been established that in the technological process of flotation, optimal dosing of reagents is an important aspect at this stage of enrichment. For optimal reagent supply and control of effective extraction, the K-mean++ mathematical modeling method was used, which determines the saturation of foam with minerals. Based on the results of mathematical modeling, recommendations for dosing reagents have been developed in order to improve mineral extraction and the control system of the flotation process.

Key words: *Flotation process, process optimization, mathematical modeling, reagent dosing, process management system, K-means++.*

Bibliographic list:

1. Selevtsov L.I. Automation of technological processes. -Vologda: Infra-Engineering, 2014. – 352 p.

2. Shilin A.N., Snitsaruk D.G. The robot's technical vision system for controlling the geometric parameters of shells - Volgograd: Devices and systems. Management, control, diagnostics, 2019. – No. 8. – C. 36-43

3. Li J., Cao B., Zhu H. and Ni F. Flotation froth image texture extraction method based on deterministic tourist walks – Multimedia Tools Appl., vol. 76, no. 13, pp. 15123-15136, 2017.

4. Ca D., He X. and Han J. Document Clustering Using Locality Preserving Indexing. IEEE Trans. Knowl. Data Eng., 2005, pp. 1624-1637.

5. Wu J., Lin Z. and Zha H. Essential Tensor Learning for Multi-View Spectral Clustering. IEEE Trans. Image Process, 2019, pp. 5910-5922.

УДК 621.376.234

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.011

РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗА ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМЛИ



Нурбоев К.М.,
заместитель председателя
Навоийского отделения АН РУз,
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Раджапов С.А.,
главный научный сотрудник
Физико-технического института
АН РУз, д.ф.-м.н.

Раджапов Б.С.,
старший научный сотрудник
Физико-технического института
АН РУз, PhD

Er qobig'idagi deformatsiya jarayonlari yaqin atrofdagi atmosferaga radon emissiyasi intensivligining o'zgarishi bilan birga keladi, bu yaqinlashib kelayotgan geodinamik o'zgarishlarning potentsial ko'rsatkichi sifatida qaralishi mumkin. Tektonik deformatsiyalar va seysmik hodisalarni bashorat qilish nuqtai nazaridan tuproq havosidagi radon hajmiy faolligining tahlil qilish katta qiziqish uyg'otadi. Ushbu maqolada radon va gamma-nurlanishni qayd etish uchun Uzbekiston Respublikasi FAning FTIda ishlab chiqarilgan kremniy detektorlari asosidagi yuqori sezgir radiometrik tizimlar qo'llanildi. radon anomaliyalari va seysmik hodisalar o'rtasidagi sabab-oqibat bog'liqligi masalasi hanuzgacha bahsli bo'lib qolmoqda: bunday anomaliyalar zilzilalarning xabarchisi hisoblanadimi yoki ularning bog'lanishlarini o'rganish geologo-taktonik strukturasi yaxshi o'rganilgan hududlarda uzoq vaqt davomida tajriba natijasida olingan reprezentativ ma'lumotlarni tahlil qilishni taqozo etadi. Shuning uchun ham ushbu maqolada radonning hajmiy faolligi er qobig'idagi deformasion jarayonlardan bog'liqligini onlayn-ryejimda o'rganildi. Maqolada Uzbekiston FA FTIda joykashgan tajriba stansiyasidagi radiometric tizimda kam intensivli zaryadlangan zarralar oqimini qayd qilish orqali radon hajmiy faolligi o'zgarishi monitoringi natijalari keltirilgan. Radon hajmiy faolligining anomal ko'rinishlari shu vaqt oralig'idagi seysmik xodisalar bilan solishtirildi.

Tayanch iboralari: *kremniy detektori, radiometrik qurilma, alfa, gamma nurlanishi, radon, radon hajmiy faolligining anomaliyalari, zilzila xabarchisi.*

Деформационные процессы в земной коре сопровождаются изменениями интенсивности эмиссии радона в приземную атмосферу, что может рассматриваться в качестве потенциального индикатора предстоящих геодинамических преобразований. Анализ аномальных всплесков объемной активности радона в почвенном воздухе представляет значительный интерес с точки зрения прогноза тектонических деформаций и сейсмических событий. В данной статье для регистрации радона и сопутствующего гамма-излучения применены радиометрические системы на основе высокочувствительных кремниевых детекторов, разработанных в ФТИ АН Республики Узбекистан. Решение задач причинно-следственной связи между радоновыми аномалиями и сейсмическими событиями требует анализа репрезентативного массива экспериментальных данных, полученных в течение длительного времени в регионах с детально изученной геолого-тектонической структурой. В связи с чем в данной статье изучены зависимость объемной активности радона от деформационных процессов в земной каре в онлайн-режиме. Приведены результаты исследования радонового мониторинга путем регистрации слабоинтенсивных потоков заряженных частиц радиометрических систем на опытной станции Физико-технического института Академии наук Республики Узбекистан. Аномальные всплески объемной активности радона сопоставлялись с зарегистрированными за тот период времени сейсмическими событиями.

Ключевые слова: *кремниевый детектор, радиометрическое устройство, альфа, гамма-излучение, радон, аномалии объёмной активности радона, предвестник землетрясения.*

Предвестники деформационных процессов – это явления, возникающие задолго до землетрясений. К ним относятся деформация почвы, изменения уровня моря, изменения уровня грунтовых вод и концентрация радона и др. Эти параметры служат основой для прогнозирования места, времени и магнитуды сейсмического события [1, 2].

Среди множества предвестников научно-обоснованным и активно применяемым в настоящее время на практике являются аномалии объемной активности радона. Постоянные деформационные процессы в земной коре вызывают изменения интенсивности поступления радона в атмосферу, что может указывать на надвигающиеся тектонические процессы. Изучение всплесков радона в почвенном воздухе позволяет прогнозировать землетрясения и деформации. Установлено также, что концентрация радона отражает насыщенность подземных трещин, их геологические особенности и напряжённое состояние оползневых масс. Анализ радоновых аномалий может использоваться как самостоятельный метод оценки оползневой опасности и устойчивости склонов [3].

Радиометрическое устройство на основе высокочувствительных кремниевых детекторов состоит из двух радиометров, одновременно измеряющих объемную активность радона в подпочвенном воздухе и активность гамма излучения. В каждом из радиометров использованы определенный тип детекторов. В радиометре для измерения активности гамма излучения использовался литий дрейфовый детектор на основе гетероструктуры α-Si–p-i-n, толщиной до 1 *мм*. Так как гамма излучение является длиннопробежным излучением, для измерения его активности используется «толстый» детектор. Для измерения объемной активности радона – гетеропереходный Al-αGe-pSi-Au детектор, толщиной 100 *мкм* и диаметром 50 *мм*. Технология изготовления разработанных детекторов описаны в работах [4, 5].

Изготовленные детекторы с незначительными потерями энергии со стороны «входного» окна-ΔEвх ~ 6-12 *кэВ* и «выходного» окна –

ΔЕвых ~ 12-20 *кэВ* позволяли регистрировать низкоэнергетические излучения малой интенсивности с обеих сторон.

Разработанная конструкция радиометрического комплекса была усовершенствована до двухканальной схемы, включающей в себя два радиометра, осуществляющие одновременную регистрацию объёмной активности радона и γ-излучения (*рис. 1*).

Рабочая камера РК-2, в центральной части которой установлен литиевый дрейфовый детектор для измерения активности γ-излучения, размещалась непосредственно в почвенном слое на измерительной станции Физико-технического института Академии наук Республики Узбекистан. Во второй рабочей камере (РК-1) размещён гетеропереходный детектор Al–αGe–pSi–Au, через который с помощью компактного поршневого воздухозаборника осуществлялся забор воздуха и обновление анализируемого почвенного воздуха [6].

Благодаря малым потерям энергии во входных и выходных окнах конструкции, детектор обеспечивал эффективную регистрацию излучения с обеих сторон чувствительной области. Воздухозаборник питался от автономного аккумуляторного блока, собранного на элементах 18650 ёмкостью 2600 *мА·ч*.

В корпусах рабочих камер были предусмотрены разъёмы для подключения детекторов к источникам питания и усилительным каскадам.

Длительный мониторинг параметров радиационной обстановки осуществлялся с использованием специализированного программного обеспечения RMI-V1.7, обеспечивающего визуализацию данных в режиме реального времени. Для дистанционного контроля измерений использовался встроенный GSM/SMS-модуль, позволяющий передавать данные на любые совместимые приёмные устройства, включая мобильные телефоны [7].

На *рис. 2* представлена схема автоматизированной системы регистрации радона в почвенном воздухе на глубине 1 *м*, а также радиометрическая установка, предназначенная для одновременного измерения объемной активности радона и уровня гамма-излучения.

В настоящее время комплекс исследований, направленных на поиск предвестников землетрясений в сейсмоактивных районах, обязательно включает мониторинг концентрации радона в грунтовых водах и почвенном воздухе.

Исследования показывают, что перед землетрясением содержание радона изменяется, повышается объемная активность радона, предшествующая тектоническим событиям. Хотя выбросы радона могут быть обусловлены и другими причинами, например, повышенной влажностью, амплитуда таких вариаций, как правило, невелика. В отличие от этого, радоновые аномалии, возникающие перед землетрясениями, имеют более выраженный характер, а их амплитуда постепенно снижается по мере удаления от эпицентра будущего землетрясения. Динамика эмиссии радона является важным индикатором сейсмической активности и может быть использована для прогноза землетрясений.

Устройство использовалось для изучения объемной активности радона и гамма-излучения, а также температуры и влажности в почвенном воздухе на научно-исследовательской станции Физико-технического института Академии наук Республики Узбекистан (*рис. 3*). Устройство осуществляет одновременное измерение температуры и влажности.

Анализ полученных данных показал, что перед тектоническими землетрясениями в исследуемом регионе наблюдалось заметное увеличение концентрации радона.

Как видно на *рис. 3в*, после зарегистрированной аномальной эмиссии радона на территории Кыргызстана были зафиксированы землетрясения магнитудой 4,6. Полученные данные были сопоставлены с последними сейсмическими событиями в Центральной Азии [8].

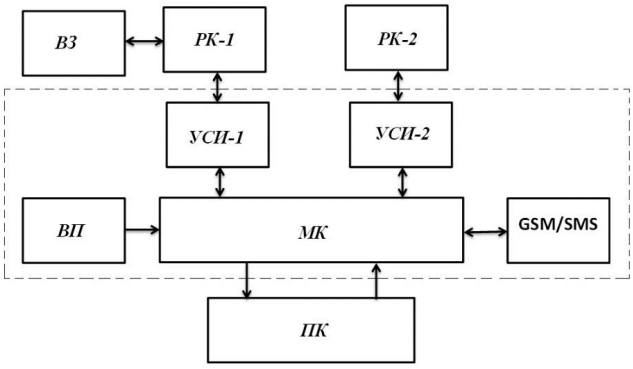


Рис. 1. Блок схема радиометрического устройства: *РК-1, РК-2 – рабочие камеры с детекторами; УСИ-1, УСИ-2 – узлы усиления и селекции информации; МК – микроконтроллер; ВП – узел вторичного электропитания; ВЗ – воздухозаборник; ПК – персональный компьютер с установленной программой, обеспечивающий одновременные измерения объёмной активности радона и гамма излучения в онлайн режиме*

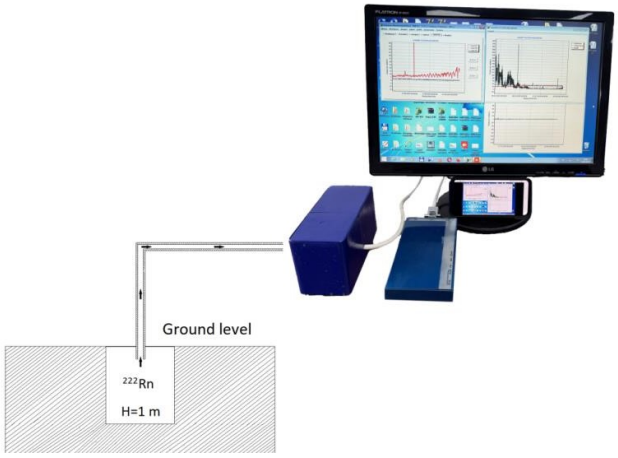


Рис. 2. Схема автоматической регистрации радона в почвенном воздухе и радиометрической установки

Важно отметить, что устройство одновременно регистрировало изменения температуры и влажности, что позволило исключить влияние метеорологических факторов на эманацию радона.

Таким образом, зафиксированные аномалии могут быть связаны с сейсмической активностью, что подтверждает перспективность метода радонового мониторинга для прогноза землетрясений.

Радиометрическое устройство состоит из двух радиометров с детекторами большой чувствительной площади и малыми толщинами «входных» и «выходных» слоёв. Такая конструкция обеспечивала возможность регистрации слабоинтенсивных потоков заряженных частиц по всей чувствительной поверхности детекторов в 2π-геометрии.

Персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением, входящим в состав комплекса, обеспечивал одновременное отображение в онлайн-режиме результатов измерений объёмной активности радона и активности гамма-излучения, регистрируемых радиометрами радона.

Измерения проводились в период с 7 января по 17 марта 2025 года. В течение этого периода гамма-излучение зафиксировано не было. Аномальные всплески объемной активности радона сопоставлялись с зарегистрированными за тот же период времени сейсмическими событиями.

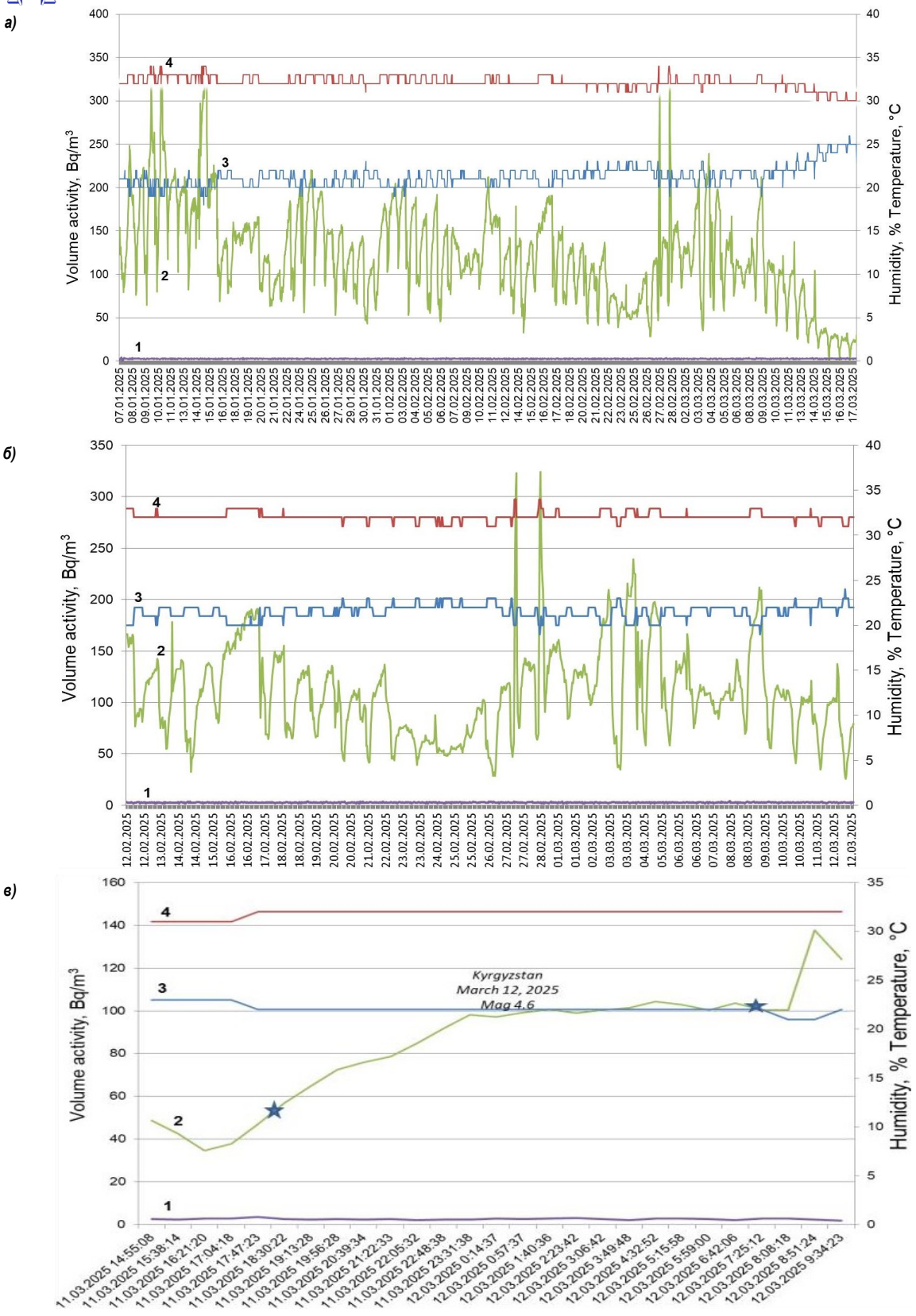


Рис. 3. Динамика эксгаляции объёмной активности радона (с температурой и влажностью) перед тектоническими землетрясениями сопоставлена для последних землетрясений в Центрально-Азиатском регионе за период: а) 07.01.–17.03.2025 г., б) 12.02.–12.03.2025 г., в) 11.03.–12.03.2025 г.: *1 – гамма; 2 – изменение интенсивности объемной активности радона во времени; 3 – изменение температуры во времени; 4 – изменение влажности во времени*

Результаты исследований показали, что активное выделение радона наблюдается в период деформационных процессов земной коры, причём землетрясения происходят спустя 6-40 ч после зафиксированных аномалий. На *рис. 3* (б) представлена динамика эмиссии радона перед тектоническими землетрясениями.

В течение периода с 12.02.2025 по 12.03.2025 было зарегистрировано 13 землетрясений магнитудой 4-4,6. Расстояние до эпицентров землетрясений составляло до 420 *км*. Временной интервал между всплесками радоновой активности и возникновением землетрясений составил от 5 до 14 ч. Эти результаты ставят три ключевых вопроса прогноза деформационных процессов и землетрясений: где, когда и какой магнитуды может произойти событие? Реализация такого прогноза требует создания сети мониторинговых станций по всей сейсмоактивной территории.

На основании полученных данных можно сделать вывод о высокой вероятности предстоящего землетрясения с эпицентром в исследуемом регионе. Эманация радона может служить надёжным индикатором надвигающихся деформационных процессов земной коры и землетрясений – задачи, требующей дальнейшего углублённого изучения.

Библиографический список:

1. Имме Д., Морелли Д. Исследование и анализ землетрясений – статистические исследования. – катания: Изд. Ин Тех, 2021г. – С. 143-160. ISBN 978-953-51-0134-5.

2. Кожухов С.А., Спивак А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А. Эманация радона как показатель интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе земной коры и атмосферы. Physics of the Earth, 2009 г. – № 2. – С. 34-48

3. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Ревазов М.О. Взаимосвязь эманации радона с уровнем внешнего воздействия на основе мониторинга крупных оползней в горных районах. – Владикавказ: Владикавказский научный центр РАН, 2021 г. – Том 13. – № 4 (50). – С. 564-575.

4. Radzhapov B.S., Radzhapov S.A., Mullagalieva F.G., Zufarov M.A. The development of semiconductor detectors for radiometers of alpha-radiation and the examination of the volumetric activity of radon in various areas Radiation Detection Technology and Methods, 2023 y. – No.7, pp. 457-463. DOI: org/10.1007/s41605-023-00406-z.

5. Muminov R.A., Radzhapov S.A., Mullagalieva F.A., Radzhapov B.S., Zufarov M.A., Nurboev K.M., Akhmedov G.M. Development of High-Efficiency Silicon Detectors and Electronic Components for a Radiometer of Alpha Radiation.- Moskow: Instruments and Experimental Techniques, 2021г. – Vol. 64. – No. 3, pp. 444-449.

6. Muminov R. A., Radzhapov S. A., Mullagalieva F. G., Radzhapov B. S., and Zufarov M. A. Development of a large-sized highly sensitive detector based on α-Si–p-i-n heterostructures for radonometers. Moskow: Atomic Energy, 2022г. – Vol. 131. – No. 6, pp. 344-346. DOI: 10.1007/s10512-022-00892-2.

7.Раджапов Б.С, Эргашев К. Э. Ионлаштирувчи нурланишни қайд этувчи GSM модулли "Алфаметр", "Бетаметр" ва "Гаммаметр" қурилмаларининг микроконтроллерга дастури таъминоти. Свидетельство на программные продукты РУз № DGU 18817. – Ташкент. 2022 г.

8. https://ds.iris.edu/seismon/index.phtml // Recent earthquakes in the Central Asia region.

УДК 621.039.8: 539.183.2

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.012

ПРИМЕНЕНИЕ РАДОНОМЕТРА МАРКИ RR-4M НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ РАДИАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В УРАНОНОСНОМ РЕГИОНЕ




Нурбоев К.М.,
заместитель председателя
Навоийского отделения АН РУз,
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Мустафоев М.А.,
самостоятельный соискатель
НГГТУ

Аллаберганова Г.М.,
доцент кафедры
«Общая физика» НГГТУ, PhD

Музафаров А.М.,
главный инженер
ЦНИЛ АО «НГМК»,
д.х.н, профессор

Ushbu maqolada FTI AN RUz tomonidan ishlab chiqilgan kremniy detektorlari asosidagi radiometrning urano-saqlovchi hududda radiatsion ko'rsatkichlarni aniqlashdagi qo'llash natijalari keltirilgan. FTI AN RUzda yaratilgan RR-4m rusumli radiometr yordamida quyidagi parametrlar aniqlandi: yer yuzasidan radon oqimi zichligi (RO'Z), ishchi zona havosidagi radonning ekvivalent barqaror hajmiy faolligi (EBHF), shuningdek, uransaqlovchi hududdagi ekvivalent dozaning quvvati.

Olingan natijalar stasionar radiometrlar – Alfarad Plus va POISK – RRA-20p2 rusumlari yordamida o'lchangan natijalar bilan taqqoslandi. Shuningdek, RO'Z va EBHF ko'rsatkichlari xalqaro tashkilotlar (MKRZ, MAGATE, BMT, JSST) tomonidan belgilangan me'yoriy ko'rsatkichlar, hamda milliy standartlar va sanitariya qoidalari (O'zbekiston Respublikasi SanPiN, O'z DSt, GOST) bilan solishtirildi.

Kalit so'zlar: *tabiiy radiatsion fon, lokal nuqta, radiometr, radiatsion ko'rsatkichlar, urano-saqlovchi hudud, hajmiy faollik, ekvivalent barqaror hajmiy faollik, radon oqimi zichligi, standart namunalar pasport ma'lumotlari.*

В данной статье приведены результаты применения разработанного в ФТИ АН РУз радиометра на основе кремниевых детекторов для определения значений радиационных показателей в ураноносном регионе. С помощью разработанного в ФТИ АН РУз радиометра марки RR-4 м определены значения плотности потока радона – ППР с поверхности почвы, эквивалентной равновесной объемной активности радона – ЭРОА в воздухе рабочей зоны и мощности эквивалентной дозы ураноносного региона. Полученные данные сопоставлены с результатами определенных с помощью стационарных радиометров – марки Альфарад Плюс и ПОИСК – RRA – 20p2. Кроме того полученные результаты по определению – ППР и ЭРОА сопоставлены с нормированными значениями установленными Международными МКРЗ, МАГАТЭ, ООН, ВОЗ и Республиканскими СанПиН, O`zDst, ГОСТами.

Ключевые слова: *естественный радиационный фон, локальная точка, радиометр, радиационный показатель, ураноносный регион, объёмная активность, эквивалентное равновесное объемную активность, плотности потока радона, паспортные данные стандартных образцов.*

Введение. Ураноносный регион характеризуется аномально высокими значениями радиационных показателей. Это связано, во-первых, с тем, что концентрация радиоактивных элементов и радионуклидов в объектах данного региона значительно превышает уровень, характерный для обычных фоновых, не ураноносных регионов. Во-вторых, распределение этих радиоактивных элементов и радионуклидов в экологических объектах региона носит неравномерный характер. Экспериментальное определение закономерностей и причин такого неравномерного распределения аномальных радиационных значений представляет научно-практический интерес. Кроме того, в соответствии с требованиями республиканских и международных нормативных документов необходимо определять концентрацию радиоактивных элементов и радионуклидов в объектах ураноносного региона с точки зрения защиты населения и охраны окружающей среды, а также для организации мониторинга радиационной обстановки в этих объектах [1-2].

Кроме того, для оценки метрологических возможностей нового радиометра марки RR-4M, разработанного в ФТИ АН РУз на основе кремниевых детекторов и предназначенного для измерения радиационных показателей в широком диапазоне.

В качестве объекта исследования были выбраны радиационно-опасные участки ураноносного региона, по которым имеется достаточный объём статистических данных [3-7].

Целью настоящего исследования является определение значений радиационных показателей в ураноносном регионе, а также оценка метрологических характеристик нового радиометра RR-4M, разработанного в ФТИ АН РУз.

С учётом вышесказанного, оценка метрологических характеристик радиометра RR-4M и возможности его применения для измерения радиационных показателей в условиях ураноносного региона является актуальной задачей экспериментальной и ядерной физики, ядерной аналитики и радиоэкологии.

Методы эксперимента.

Для определения значений плотности потока радона (ППР) с поверхности почвы, а также эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА) в воздухе рабочей зоны и на территории промышленной площадки ураноносного региона применялись:

– портативный радиометр RR-4M (ФТИ АН РУз, разработка на основе кремниевых детекторов);

– стационарный радиометр Альфарад+ (Россия),

– стационарный радиометр ПОИСК RRA-20p2 (Россия).

Результаты и их обсуждение.

Результаты по определению значений плотности потока радона (ППР) с поверхности почвы, эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА) в воздухе рабочей зоны, а также мощности эквивалентной дозы в ураноносном регионе с применением радио-

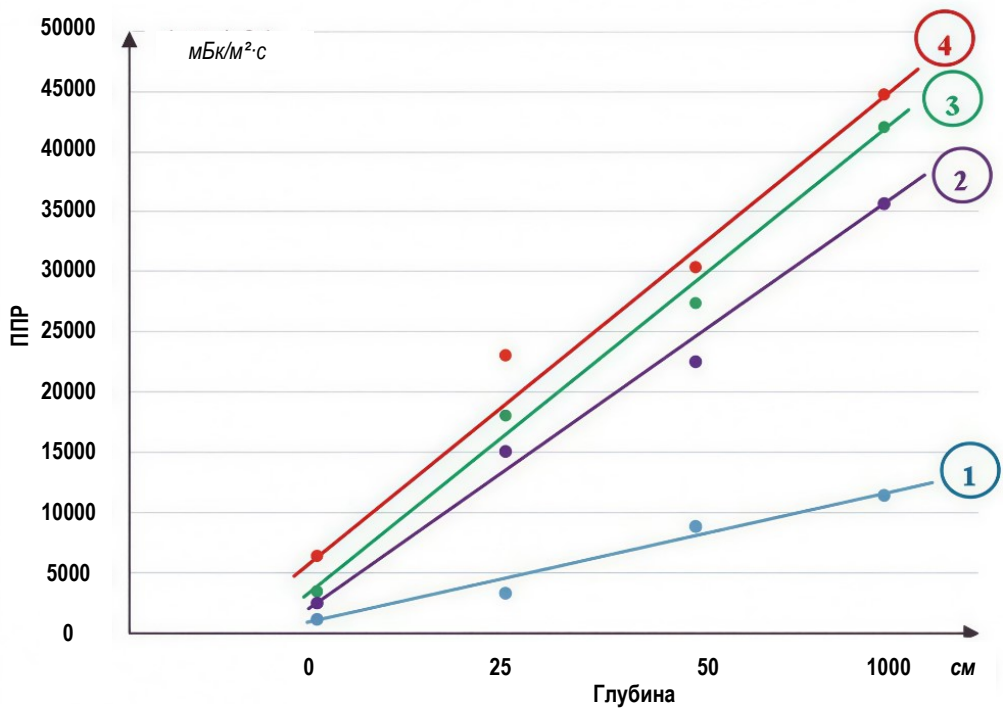


Рис. 1. Графическая зависимость изменения значений плотности потока радона (ППР) от глубины ямы накопления радонового газа

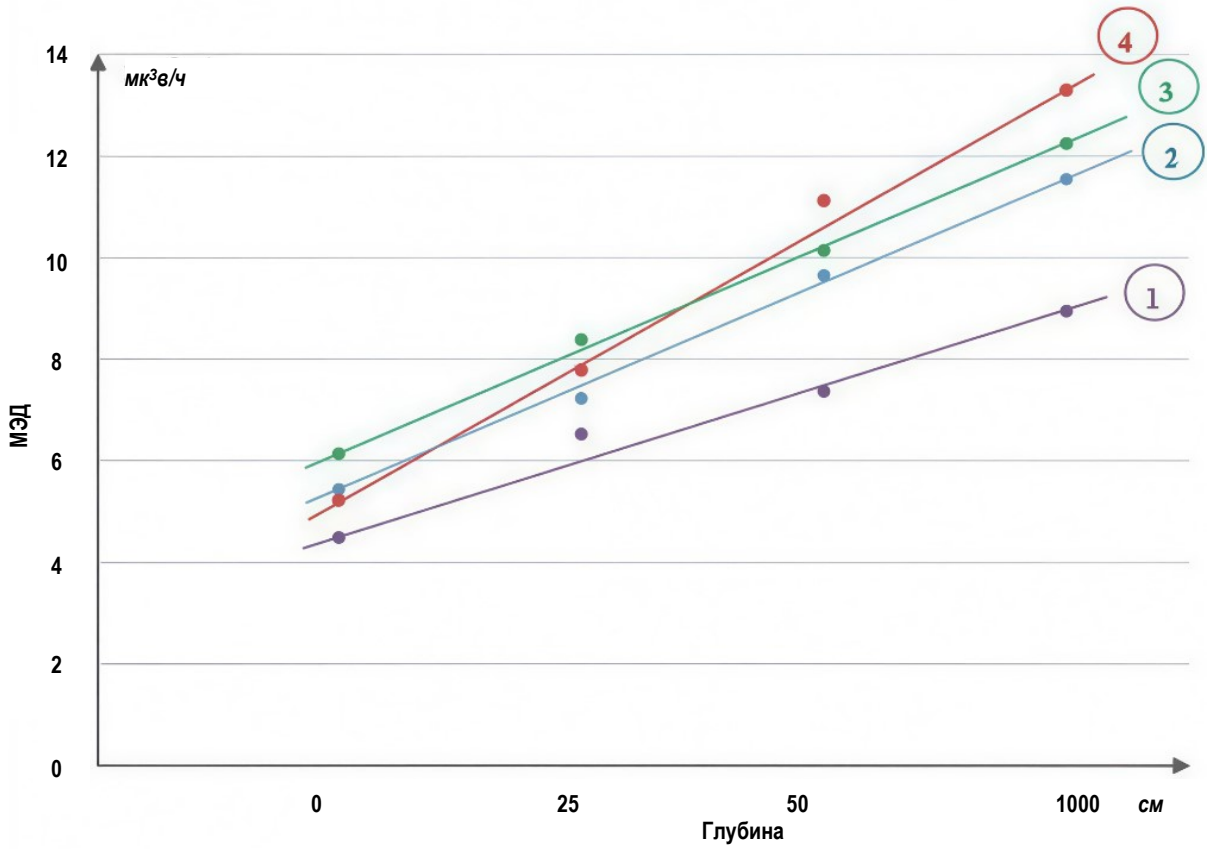


Рис. 2. Графическая зависимость изменения значений мощности эквивалентной дозы (МЭД) по глубине ямы накопления радонового газа

метра марки RR-4M, разработанного в ФТИ АН РУз, приведены в *табл. 1.* Как видно из результатов, приведённых в *табл. 1*, значения плотности потока радона (ППР) с поверхности почвы, эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА) в воздухе рабочей зоны и мощности эквивалентной дозы (МЭД) в ураноносном регионе различаются между собой. В наблюдательных точках значения ППР, ЭРОА и МЭД относительно ниже, чем на участках с промышленными выбросами урана, в хвостохранилищах урановых отходов и в отвалах забалансовых руд. И наоборот, на этих участках значения ППР, ЭРОА и МЭД несколько раз превышают значения в наблюдательных точках.

Полученные результаты мониторинга показывают, что значения ППР, ЭРОА и МЭД всегда ниже нормативных значений, установленных СанПиН №0196-06.

На основании этого можно сделать вывод, что радиационная обстановка на исследуемой территории по показателям ППР с поверхности почвы, ЭРОА в воздухе рабочей зоны и МЭД в данных точках ураноносного региона не превышает норм, установленных международными и республиканскими документами по радиационной безопасности.

Результаты по определению значений ППР с поверхности почвы, ЭРОА в воздухе рабочей зоны и МЭД в ураноносном регионе с помощью стационарных радиометров – марки Альфарад+ (Россия) и марки ПОИСК RRA-20p2 (Россия) приведены в *табл. 2.*

Как видно из результатов сопоставления, приведённых в табл. 2, значения плотности потока радона (ППР) с поверхности почвы, эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА) в воздухе рабочей зоны и мощности эквивалентной дозы (МЭД) в ураноносном регионе в обоих случаях близки друг к другу.

Все значения ППР, ЭРОА и МЭД, определённые с помощью стационарных радиометров – марки Альфарад+ (Россия) и марки ПОИСК RRA-20p2 (Россия), значительно выше, чем значения, определённые с помощью радиометра марки RR-4M, новоразработанного в ФТИ АН РУз. Данный факт требует проведения дополнительных исследований для уточнения причин отклонений в результатах стационарных радиометров.

В рамках исследований, кроме значений ППР с поверхности почвы, ЭРОА в воздухе рабочей зоны и МЭД в ураноносном регионе, полученных с применением радиометра марки RR-4M, новоразработанного в ФТИ АН РУз, были определены изменения значений ППР по глубине. На основании полученных данных построены графические зависимости, приведённые на *рис. 1.*

Как видно из *рис. 1*, с увеличением глубины ямы накопления радонового газа значение ППР изменяется в определённом диапазоне. Эксперименты проводились на локальных участках – в наблюдательных зонах, в местах промышленных выбросов (ПВ) урана, а также в выбранных точках хвостохранилищ и отвалах забалансовых руд.

На графике изображены четыре линии, которые последовательно показывают зависимость изменений значений ППР от глубины ямы накопления радонового газа.

1 – линия показывает зависимость изменений значений ППР с увеличением глубины ямы накопления радонового газа в наблюдательных зонах. Установлено, что значение ППР при глубине от 0 *см* до 100 *см* изменяется в диапазоне от 1200 *мБк/м²·с* до 6100 *мБк/м²·с*.

2 – линия показывает зависимость изменений значений ППР с увеличением глубины ямы накопления радонового газа в участках промышленного выброса (ПВ) урана. Значение ППР при глубине от 0 *см* до 100 *см* изменяется в диапазоне от 2500 *мБк/м²·с* до 35100 *мБк/м²·с*.

3 – линия показывает зависимость изменений значений ППР с увеличением глубины ямы накопления радонового газа в хвостохранилищах урановых отходов. Значение ППР при глубине от 0 *см* до 100 *см* изменяется в диапазоне от 3700 *мБк/м²·с* до 42000 *мБк/м²·с.*

4 – линия показывает зависимость изменений значений ППР с увеличением глубины ямы накопления радонового газа в отвалах забалансовых руд. Значение ППР при глубине от 0 *см* до 100 *см* изменяется в диапазоне от 7100 *мБк/м²·с* до 45000 *мБк/м²·с.*

Данный факт требует проведения дополнительных исследований для выявления истинных причин увеличения значений ППР с увеличением глубины ямы накопления радонового газа.

Помимо изменений значений ППР по глубине ямы накопления радонового газа, в исследуемых районах проведены замеры мощности эквивалентной дозы (МЭД) в каждой точке. На основании полученных данных построена графическая зависимость значений МЭД от изменения глубины ямы накопления радонового газа (*рис. 2*).

Как видно из рис. 2, с увеличением глубины ямы накопления радонового газа значение мощности эквивалентной дозы (МЭД) изменяется в определённом диапазоне. Эксперименты проводились на локальных участках – в наблюдательных зонах, в участках промышленных выбросов (ПВ) урана, в выбранных точках хвостохранилищ и в отвалах забалансовых руд.

На графике изображены четыре линии, которые последовательно показывают зависимость изменения значений МЭД с увеличением глубины ямы накопления радонового газа:

1 – линия показывает зависимость изменений значений МЭД в наблюдательных зонах. Значения МЭД при глубине от 0 *см* до 100 *см* изменяются в диапазоне от 5,6 *мк³в/ч* до 8,5 *мк³в/ч*.

2 – линия показывает зависимость изменений значений МЭД в участках ПВ урана. Значения МЭД при глубине от 0 *см* до 100 *см* изменяются в диапазоне от 7,4 *мк³в/ч* до 11,2 *мк³в/ч*.

3 – линия показывает зависимость изменений значений МЭД в хвостохранилищах урановых отходов. Значения МЭД при глубине от 0 *см* до 100 *см* изменяются в диапазоне от 6,2 *мк³в/ч* до 12,4 *мк³в/ч.*

4 – линия показывает зависимость изменений значений МЭД в отвалах забалансовых руд. Значения МЭД при глубине от 0 *см* до 100 *см* изменяются в диапазоне от 5,3 *мк³в/ч* до 13,6 *мк³в/ч.*

Изменение значений в первых трёх точках растёт линейно, однако четвёртая линия показывает более интенсивный рост. Этот факт вызвал наш интерес, и мы намерены провести дополнительные исследования для выявления истинных причин более интенсивного увеличения МЭД с глубиной ямы накопления радонового газа по сравнению с остальными участками.

Таким образом, на основании проведённых исследований установлено, что новоразработанный в ФТИ АН РУз радиометр марки RR-4M на основе кремниевых детекторов пригоден для определения значений радиационных показателей в ураноносном регионе. Значения ППР, ЭРОА и МЭД, определённые в различных наблюдательных точках, на участках ПВ урана и в хвостохранилищах урановых отходов, между собой различаются.

Несмотря на это, полученные результаты мониторинга показывают, что все значения ППР, ЭРОА и МЭД всегда ниже нормативных значений, установленных в СанПиН №0196-06, и соответствуют нормам, установленным в международных и республиканских документах по радиационной безопасности.

Требуются дополнительные исследования для выявления истинных причин изменений значений ППР и МЭД с увеличением глубины ямы накопления радонового газа.

На основании проведённых исследований установлено также, что значения ППР, ЭРОА и МЭД, определённые с помощью радиометра марки RR-4M, новоразработанного в ФТИ АН РУз, значительно выше значений, полученных стационарными радиометрами – марки Альфарад+ (Россия) и марки ПОИСК – RRA-20p2 (Россия). Рекомендуется проведение дополнительных исследований для уточнения причин этих отклонений и для улучшения метрологических характеристик радиометра марки RR-4M.

Библиографический список:

1. Музафаров А.М., Аллаберганова Г.М., Кулматов Р.А. Оценка радиационной опасности урановых предприятий для объектов окружающей среды // XXI век. Техносферная безопасность. – Москва. Том 6. №1., 2021. – С. 94-102
2. Аллаяров Р.М., Музафаров А.М., Аллаберганова Г.М. Инструментальные методы количественного определения урана и сопутствующих элементов в пробах забалансовых урановых отвалов // Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2022. – №1 (88). – С. 92-94.
3. Музафаров А.М., Аллаберганова Г.М., Турабджанов С.М., Аллаяров Р.М. Новый способ рекультивации загрязненных радионуклидами почв участков подземного выщелачивания урана // Universum: Технические науки. – Москва. Выпуск: 6(75). Июнь. 2020. Часть 2. – С. 91-96.
4. Музафаров А.М., Саттаров Г.С., Ослоповский С.А. Радиометрические исследования техногенных объектов // Цветные металлы. – Москва: «Руда и металлы», 2016. № 2. – С. 15-18.
5. Аллаяров Р.М., Назаров Ж.Т., Аллаберганова Г.М., Музафаров А.М. Исследование коэффициентов обогащения химических элементов в урановых отвалах методом инструментального нейтронно-активационного анализа // Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2022. – № 4 (91). – С. 102-109.
6. Аллаяров Р.М., Туйгунова Х.М., Музафаров А.М. Рентгенофлуоресцентный метод определения урана и химических элементов в пробах забалансовых урановых отвалов. Материалы X Международной научно-практической конференции на тему: «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». – Междуреченск, 22 апреля 2021 г. – С. 217-219.
7. Музафаров А.М., Кулматов Р.А. Ражаббоев И., Ёкубов О.М. Способ дезактивации загрязненных радионуклидами почв, отобранных из участков подземного выщелачивание урана // Горный информационно аналитический бюллетень. «Физика-химическая геотехнология. Инновации и тенденции развития». 2021. (3-1). – С. 110-118
8. Аллаберганова Г.М., Туробжонов С.М., Музафаров А.М. Методика предварительной оценки природных вод на радиоактивность ураноносного региона // Горный вестник Узбекистана № 3 (78). – Навои, 2019. – С. 106-108.
9. Музафаров А.М. Аллаберганова Г.М., Мустафоев М.А. Методика проведения изотопного анализа урана в различных природных водах ураноносных регионов Узбекистана // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции 23-26 сентября. 2019. Севастополь – Россия. – С. 1104-1107.

UO‘K 547.821

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.013

BUG‘ FAZADA PIRIDIN VA PIRIDIN HOSILALARI SINTEZI




Umrzoqov A.T.,
NDKvaTU “Kimyoviy texnologiya” kafedrasi dotsenti, t.f.f.d.

Muxiddinov B.F.,
NDKvaTU “Kimyoviy texnologiya” kafedrasi professori, k.f.d.

Ikramov A.,
TKTI “Organik sintez texnologiyasi” kafedrasi professori, t.f.d.

Vapoyev H.M.,
NDKvaTU “Kimyoviy texnologiya” kafedrasi professori, t.f.d.

Katalizator o‘zagi sifatida mahalliy tabiiy xom ashyolardan foydalangan holda piridin va piridin hosilalari sintez qilishdir. Katalizator o‘zagi sifatida Angren kaolinlari, Navbahor bentoniti va Karmana konidan olingan seolit tarkibli shaffof bo‘lmagan jinslardan foydalanilgan. Tegishli sorbentlarni termik, kislotali va gidrotermik ishlov berish natijasida sorbentlar va faol komponentlardan turli modifikatsiyadagi katalizatorlar yaratigan. Katalizatorlarning fizik-kimyoviy va eksplutatsion xossalari o‘rganilgan. Sintez qilingan katalizatorlar yordamida atsetilen, ammiak va metanolning katalitik kondensatsiyasi jarayonlarini o‘rganish amalga oshirilgan. Mahsulot unumiga katalizatorlar tabiati va miqdori hamda haroratlar ta’siri o‘rganilgan. Piridin va piridin hosilalarini hosil qilishning gipotetik mexanizmi taklif qilingan. Sintez jarayoni uchun optimal harorat 400ºC ekanligi aniqlangan. O‘rganilgan katalizatorlar orasida eng faol katalizator KRXKTJ-5 ekanligi aniqlangan va unum 84 % ni tashkil etgan.

Kalit so‘zlar: *atsetilen, ammiak, metanol, ammonoliz, piridin, α-pikolin, β-pikolin, γ-pikolin, geterogen kataliz, katalizator, o‘zak, faol komponent, harorat.*

В качестве сорбентов катализатора выступает синтез пиридина и производных пиридина с использованием местного природного сырья. В качестве катализатора использовались с Ангреновыми каолинами, Навбахорским бентонитом и непрозрачные породы цеолитом из месторождения Кармана. В результате термической, кислотной и гидротермальной обработки соответствующих сорбентов из сорбентов и активных компонентов создаются катализаторы различных модификаций. Изучены физико-химические и эксплуатационные свойства катализаторов. Проведены исследования процессов каталитической конденсации ацетилена, аммиака и метанола с использованием синтезированных катализаторов. Были изучены природа и количество катализаторов, а также влияние температур на выход продукта. Предложен гипотетический механизм образования пиридина и производных пиридина. Установлено, что оптимальной температурой для процесса синтеза является 400ºC. Среди изученных катализаторов наиболее активным катализатором оказался КЦХКГП-5, а его выход составил 84 %.

Ключевые слова: *ацетилен, аммиак, метанол, аммонолиз, пиридин, α-пиколин, β-пиколин, γ-пиколин, гетерогенный катализ, катализатор, носитель, активный компонент, температура.*

Piridin va piridin hosilalari kimyo sanoatda ko‘plab organik va ba’zi noorganik moddalarning erituvchisi, ekstragentlar, vinilpiridinlar sintezi uchun yarim mahsulotlar, sirt-faol moddalar (SFM), yuqori sifatli sintetik kauchuklar, rezina vulkanizatsiya tezlatkichlari, ion almashinuvchi smolalar, farmatseftikada dorivor moddalar, to‘qimachilik sanoati bo‘yovchi vositalar, qishloq xo‘jaligida pestitsidlar, gerbitsidlar, insektitsidlar, stimulyatorlar olishda, kino va fotomateriallar sintezida boshlang‘ich moddalar, korroziya ingibitorlari ishlab chiqarish texnologiyasida keng miqiyosda ishlatiladi.

Katalitik usulda atsetilen, karbonilli birikmalar va metanolning aminlanishidan piridin va piridin hosilalari sintezi istiqbolli usul hisoblanadi. Sanoat katalizatorlari uchun asosan $Al(OH)_3$, α-Al_2O_3, diatomit, seolit va kaolin, shuningdek ularning hosilalari o`zak sifatida ishlatiladi.

Katalizatorlar tayyorlash jarayonida alyumosilikatlar minerallari quritilib va kuydirilganda murakkab fizik-kimyoviy jarayonlar va fazaviy o‘zgarishlar sodir bo‘ladi, buning natijasida mineralogik tarkib o‘zgaraganligi sababli katalitik faol sirt ortadi. Piridin, *α*-, *β*- va *γ*-pikolinlar sintezida mis, simob, rux, kadmiy, xrom va temir tuzlari hamda oksidlarining turli o‘zaklar orqali tayyorlangan katalizatorlari keng miqyosda qo‘llaniladi.

Azot saqlagan geterotsiklik birikmalar sintezi uchun selektiv ta’sir etuvchi katalizatorlarni yaratish kimyo va kimyoviy texnologiyaning dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi.

Piridin va piridin hosilalari sinteziga – katalizatorlar, faol komponentlar va o‘zaklarning tabiati va miqdori, peptizatorlarning tabiati, harorat, boshlang‘ich moddalarning hajmiy nisbatlari, bosim, xom ashyolarning berilish tezligi, reagentlarning katalizatorga sorbiyalanishi va desorbsiyalanishi, geterotsikllanishi kabi ko‘plab omillar ta’sir etadi [1-10].

Tabiiy qatlamli alyumosilikatlarning asosiy kimyoviy tarkibi SiO_2 (30-70 %), Al_2O_3 (10-40 %) va turli qo‘shimchalardan iborat. Kaolinitlardagi bir-biriga nisbatan parallel joylashgan gidroksil guruhlari qatlamlari oktaedr panjarasi kislorod atomlariga tutashgan tetraedrik qo‘shni qatlam o‘rtasida vodorod bog‘larini hosil qiladi. Montmorillonit – bu uch qatlamli tuzilishli: bir-biriga qaragan ikki qatlamli kremniy-kislorodli tetraedrik, ikkala tomoni alyumogidroksilli oktaedrik qatlamlari bilan qoplangan. Karmana tog‘ jinslari minerali geylandit tarkibli seolit tipidagi silikat karkasli mineral hisoblanadi. Tabiiy qatlamli alyumosilikatlar tarkibidagi qo‘shimcha moddalar sorbentlarning funksional xossalariga salbiy ta’sir ko‘rsatadi.

Ushbu tadqiqot ishida atsetilen, karbonilli birikmalar, spirtlarning ammiak bilan kondensatsiyasi jarayoni natijasida olinadigan moddalar sintezi unumiga katalizator va o‘zaklar tabiati hamda miqdori, harorat, boshlang‘ich moddalarning hajmiy nisbatlari ta’siri o‘rganildi. Azot saqlagan geterotsiklik birikmalar sintezi uchun kaolin, Navbahor bentonitining turli markalari va Karmana tog‘ jinslari minerallari o‘zaklari (sorbent) qayta ishlandi, turli mineral hamda organik kislotalar peptizatorligida modifikatsiyalangan katalizatorlar yaratildi. Yaratilgan katalizatorlar piridin va piridin hosilalari sintezi uchun selektiv ta’sir qiluvchi katalizator ekanligi aniqlandi.

1-jadval

Tayyorlangan katalizatorlarning fizik-kimyoviy va eksplutatsion xossalari

№	Katalizator tarkibi (%) va shartli belgisi	Solishtirma yuza, m^2/g	G'ovaklarning o'rtacha o'lchami, A^o	Mexanik mustahkamlik, kg/sm^2	Sochma zichlik, g/sm^3
1.	ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 87 (RXK-10)	146	30	45	723
2.	ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 87 (RXB+-10)	147	32	50	738
3.	ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 87 (RXKTJ-10)	149	34	44	720
4.	CdO – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 82 (KRXK-5)	149	43	47	725
5.	CdO – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 82 (KRXB-5)	151	44	54	736
6.	CdO – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 82 (KRXKTJ-5)	152	46	47	721

Tadqiqot obekti va tadqiqot usullari. Yangi turdagi tayyorlangan katalizatorlarning adsorbsiyasi va boshqa xususiyatlari kristall panjaralarining o'ziga xosligi va sirt yuzasining turlichaligiga bog'liq. Dastlabki reagentlar va katalizatorlarning tabiati, shuningdek, jarayonlarning maqsadli mahsulotlarining rentabelligi va ularning assortimentiga ta'sirini baholash ancha murakkabligi sababli sanoat miqyosida ishlab chiqarishda istiqbolli yo'nalishlarning aniqlanishi muhim hisoblanadi. Piridin va piridin hosilalari sintezida qo'llanilayotgan katalizatorlar faolligi bilan bir qatorda, tannarxi, mexanik va termik ta'sirlarga barqarorligi ham alohida ahamiyatga ega. Katalizatorlarning fizik-kimyoviy va eksplutatsion xossalari: solishtirma yuzasi (m^2/g) suyuq azotli g'ovaklikni va yuzani aniqlash laboratoriya qurilmasida, g'ovakliklarining o'rtacha o'lchami (A^o) simobli g'ovaklikni va yuzani aniqlash laboratoriya qurilmasida (simob porometriyasi), mexanik mustahkamligi (kg/sm^2) AUTOGRAPH AGS-X-50 *kN* qurilmasida, sochma zichligi (g/sm^3) Plotnomer ПУ 0,5-1,0 qurilmasida aniqlandi.

Katalitik sistemalarning katitik faolligi katalizatorning g'ovaklilik o'lchamiga va solishtirma yuzasiga bevosita bog'liq bo'lganligi sababli g'ovaklilik strukturalarini hosil qilish uchun modifikatorlar, solishtirma yuzasi va tovar ko'rinishi yuqori bo'lishi uchun plastifikatorlardan foydalanilgan. G'ovaklilik o'lchami ortgan sari ularning solishtirma yuzasi ham ortib boradi. KRXKTJ-5 (CdO-5; ZnO-10; Cr_2O_3-3; KTJ-82) katalizatorining g'ovaklilik o'lchami 46 A^o ga, solishtirma yuzasi esa 152 m^2/g ga teng ekanligi aniqlandi. Sanoat katalizatorlariga qo'yiladigan talablardan biri mexanik mustaxkamlik ko'rsatgichlari hisoblanadi. Katalizatorlarning mexanik mustahkamligi 45-54 kg/sm^2 oralig'ida ekanligi aniqlandi. Tegishli o'zaklar 650-700ºC haroratda termik qayta ishlanganda minerallar teksturali tuzilishini saqlab qoladi.

Kislota-asos markazlarining kuchi va konsentratsiyasi vizual indikator Ekspress usuli va elektron diffuziya aks ettirish spektrlari (EDS (ESDO)) bilan aniqlandi. Kislota-asos markazlarining kuchi va konsentratsiyasini aniqlash uchun pK_a qiymati bilan tavsiflangan turli xil kuchli ўзaкlar va katalizatorlar sirtining kislotali va tayanch markazlari bilan o'zaro ta'sirlashganda elektron spektrlarning ko'rinadigan mintaqasida o'ziga xos assimilyasiya polosalariga ega bo'lgan indikatorlar (antraxinon (-8,2), benzalatsetofenon (-5,6), ditsintalatseton (-3,3), benzolazodifenilamin (+1,5), bromkrezolpurpur (+6,1), neytralrot (+6,8), fenolftalein (+9,3), timolftalein (+10,3)) orqali o'rganildi.

Tajriba qismi. Piridin va piridin hosilalari sintezi uchun kadmiy, rux va xrom birikmalarini o'z ichiga olgan yangi turdagi katalizatorlar yaratildi. Katalizator ўзaги sifatida Angren kaolini (K), Navbahor bentoniti (B), seolit tarkibli Karmana tog' jinslari (KTJ) ishlatildi. Tegishli o'zaklar tarkibidagi turli organik moddalardan tozalash uchun haroratni 100ºC boshlab 50ºC intervalda 600ºC gacha olib borildi va 600ºC da 3 *soat* davomida куйдирилди. Termik qayta ishlangan o'zaklar 25 % li HCl bilan kislotali qayta ishlandi va distillangan suv bilan yuvildi. Termik va kislotali qayta ishlangan o'zaklar 100-200ºC haroratda gidrotermik usulda modifikatsiyalandi. Kaolinlarning asosiy qismi kaolinitdan, Navbahor bentoniti markalarining asosiy qismi montmorillonitdan, seolit tarkibli Karmana tog' jinslarining eng yaxshi teksturali xususiyatlarini saqlagan holda geterotsikllanish jarayonlariga katalizatorlar ishlab chiqarish muhim ahamiyat kasb etadi. Sintezni amalga oshirishda qo'llanilgan katalizatorlarning fizik-kimyoviy va eksplutatsion xossalari o'rganildi va natijalari *1-jadvalda* keltirilgan. Tadqiqotlarni o'tkazish uchun tegishli o'zaklar asosida kadmiy, rux, xrom oksidlari orqali yangi turdagi katalizatorlar ishlab chiqildi. Modifikatsiyalangan katalizatorlar atsetilen, ammiak va metanolning katalitik kondensatsiyasidan piridin va piridin hosilalari sintezi jarayonlari uchun qo'llanildi. Geterogen katalitik jarayonlar maxsus oqimli sinov reaktorida amalga oshirildi. Reaktorning pastki qismiga simli to'r o'rnatilib, ustiga chinni bo'lakchalari qo'yiladi. Chinni bo'lakchalarining ustiga 200 *g* tegishli katalizator namunasi joylashtirildi va katalizatorning ustki qismi ham chinni bo'lakchalari (inert qavat) bilan to'ldirildi. Inert qavat o'z navbatida moddalaming katalizator hajmi bo'yicha harorati bir xil bo'lishini ta'minlaydi. Bug'lantirilgan metanol, atsetilen va ammiak sarf o'lchagich orqali aralashtirgichga yuboriladi. Kerakli xajmiy nisbatlarda aralashtirilgan gazlar aralashmasi tegishli haroratda reaktorga kiritiladi. Jarayon 360-420ºC haroratlar oralig'ida olib boriladi.

Reaktor elektr qizdirgichda qizdiriladi va reaktordagi harorat termoparalar orqali aniqlab boriladi. Jarayon harorati laboratoriya latri orqali nazorat qilinadi. Kuchlanish potensiometr orqali aniqlab boriladi. Reaksiya natijasida hosil bo'lgan moddalar reaktorning chiqish qismi orqali chiqariladi hamda xavo va Libix sovitgichlarda sovutiladi va katalizat yig'gichda yig'iladi. Olingan katalizat haydash qurilmasida ajratiladi. Reaksiyon gazlari aralashmasi absorbsiya jarayoniga yuboriladi va absorberda suv orqali absorbsiya qilinadi va gaz moddalar sistemadan tashqi muhitga chiqariladi.

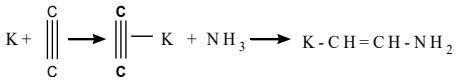
Katalizatdan sintez qilingan moddalar haydash yo'li bilan ajratib olinadi. Sintez qilingan mahsulotlar tarkibi potensiometrik titrlash orqali, nur sindirish ko'rsatgichi URF refraktometri orqali aniqlandi. Piridin $t_{(qayn)}$ = 115-116ºC, n_D^{20} = 1,5100; α-Pikolin $t_{(qayn)}$ = 128-129ºC, n_D^{20} = 1,5010; β-Pikolin $t_{(qayn)}$= 142-143°C, n_D^{20} = 1,5042; γ-Pikolin $t_{(qayn)}$ = 144-145ºC, n_D^{20} = 1,5058.

Tadqiqot natijalari va muhokamasi. Atsetilen ammonolizini karbonilli birikmalar yoki spirtlar ishtirokida olib borish samarali usullardan biri hisoblanadi. Atsetilen va metanolning aminlanishidan piridin hosilalarning hosil bo'lishi vinillanish, degid-rotsikllanish, izomerlanish, trimerlanish, turli smolalar va boshqalar parallel va ketma-ket reaksiyalarning murakkab jarayonlari bilan boradi. Ushbu jarayonlar bug', gaz fazasida bu faqat ko'p funksiyali katalizatorlar ishtirokida olib borilishi kerak. Atsetilen va karbonil birikmalarining bug' fazasidagi reaksiyalarida asosan d-orbitallari elektronlar bilan to'lmagan metall birikmalari, shuningdek, kadmiy, rux, xrom, temir – oksidlari, fosfatlari, volframatlari, vanadatlari, molibdatlari va xromatlari saqlagan katalizatorlar yuqori faollikni namoyon qiladi. Ushbu jarayonlarga kadmiy, rux, xrom, temir saqlagan katalizatorlar, shuningdek turli mineral kislotalar bilan qayta ishlangan KKF katalizatorlari sinab ko'rildi. Metanolning yuqori harorat ta'sirida degidrogenlanib formaldegid hosil qilishi, formaldegid va atsetilenning aminlanish reaksiyalari orqali piridin va piridin hosilalari sintez qilinadi [11-13]. Katalitik jarayonlarda suv, organik moddalar va turli smolalar aralashmasidan iborat katalizat hosil bo'ladi. Katalizatdan organik moddalar tegishli usullar yordamida ajratiladi. Geterotsikllanish jarayoni uchun yangi katalitik tizimlar va jarayonning gipotetik mexanizmlari taklif etildi:

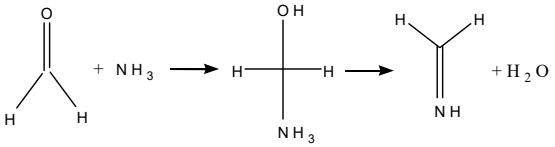
2-jadval

Atsetilen, ammiak va metanolning bug` fazada katalitik kondensatsiyasi mahsulotlari unumiga katalizator tabiatining ta'siri (C_2H_2:NH_3:CH_3OH nisbati = 1:2:1; harorat 400ºC)

№	Katalizator tarkibi (%) va shartli belgisi	C_5H_5N	α- P	β- P	γ-P	q. m.
1.	*ZnO* – 8; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 89 (RXK-8)	18	5	3-4	–	73
2.	*ZnO* – 8; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 89 (RXB-8)	21	9	6	–	64
3.	*ZnO* – 8; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 89 (RXKTJ-8)	22	9	6	–	65
4.	*ZnO* – 10; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 87 (RXK-10)	23	9	5-6	–	62
5.	*ZnO* – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 87 (RXB-10)	25	12	5-6	–	57
6.	*ZnO* – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 87 (RXKT-10)	26	13	5-6	2	53
7.	*ZnO* – 12; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 85 (RXK-12)	19	5	3	–	73
8.	*ZnO* – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 85 (RXB-12)	22	10	4	–	64
9.	*ZnO* – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 85 (RXKT-12)	24	11	6	2	57
10.	*CdO* – 3; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 84 (KRXK-3)	26	12	6	2	54
11.	*CdO* – 3; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 84 (KRXB-3)	27	12	7	2	52
12.	*CdO* – 3; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 84 (KRXKTJ-3)	33	17	9	2-3	38
13.	*CdO* – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 82 (KRXK-5)	30	22	10	2-3	35
14.	*CdO* – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 82 (KRXB-5)	36	23	12	3	26
15.	*CdO* – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 82 (KRXKTJ-5)	38	25	12-13	8	16
16,	*CdO* – 7; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 80 (KRXK-7)	28	10	7	3-4	51
17.	*CdO* – 7; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 80 (KRXB-7)	31	15	7	3-4	43
18.	*CdO* – 7; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 80 (KRXKTJ-7)	33	18	8-9	4	36



Vinilaminning konversiyasi katalizatorning kislotaliligi va faol markazlarning tabiatiga bog'liq. Vinilaminning katalizator yuzasiga kam sorbsiyalanganligi va yaxshi desorbsiyalanishi sababli vinilamin va aldiminning o'zaro ta'sirlashishi natijasida piridin sintez qilinadi:.

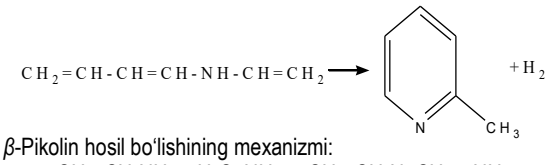


$CH_2=CH-NH_2 + H_2N-CH=CH_2 + H_2C=NH \rightarrow C_5H_5N + 2NH_3 + H_2$

α-Pikolin hosil bo'lishining mexanizmi:

$CH_2=CH-NH_2 + C_2H_2 \rightarrow CH_2=CH-CH=CH-NH_2$

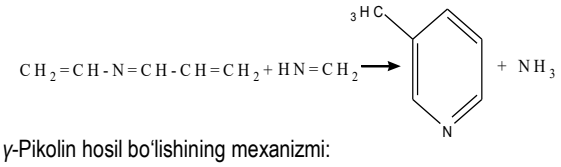
$CH_2=CH-CH=CH-NH_2 + C_2H_2 \rightarrow CH_2=CH-CH=CH-NH-CH=CH_2$



β-Pikolin hosil bo'lishining mexanizmi:

$CH_2=CH-NH_2 + H_2C=NH \rightarrow CH_2=CH-N=CH_2 + NH_3$

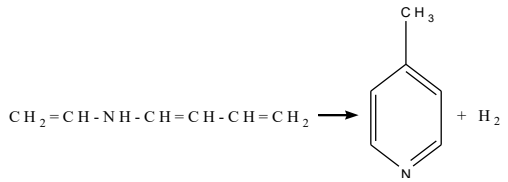
$CH_2=CH-N=CH_2 + C_2H_2 \rightarrow CH_2=CH-N=CH-CH=CH_2$



γ-Pikolin hosil bo'lishining mexanizmi:

$CH_2=CH-NH_2 + C_2H_2 \rightarrow CH_2=CH-NH-CH=CH_2$

$CH_2=CH-NH-CH=CH_2 + C_2H_2 \rightarrow CH_2=CH-NH-CH=CH-CH=CH_2$



Atsetilen, ammiak va metanolning bug` fazada katalitik kondensatsiyasi jarayonlariga qo`llanilgan katalizatorlar tabiati ta'siri bo`yicha tadqiqotlar o`tkazildi va natijalari *2-jadvalda* keltirilgan.

Atsetilen va ammiakni faollashtirish mexanizmi bo'yicha tahlillar shuni ko'rsatdiki, d-metall birikmalari (kadmiy, rux, xrom, temir, kobalt) gaz fazasida ammiak va aminlarning vinillanishi, degidrogenlash va degidratlash jarayonlari uchun keng qo'llaniladigan katalizatorlar hisoblanadi. Kadmiy va rux ionlari atsetilen va ammiak molekulalarining faollashishini va katalizator yuzasidagi faol markazlar Cd^{2+}, Zn^{2+}, Fe^{2+} ammiakdan amid guruhlari hosil qiladi. Kadmiy saqlagan katalizatorlari 3-4 % gacha xrom (III) oksidi bilan promotorlanganda piridin sintezi uchun selektivligi ortishi aniqlandi. Xrom oksidi promotor sifatida katalizatorning faol markazlari kadmiy va ruxning mahsulot hosil bo'lishidagi samaradorligini oshiradi, shuningdek, atsetilen va ammiakdan oraliq mahsulot vinilamin hosil bo'lishini tezlashtiradi. Katalizator o'zaklari sifatida kaolin (AKF-78 (AK)), bentonit (Navbahor bentoniti (NB)) va seolit tarkibli Karmana tog' jinslaridan (KTJ) foydalanish istiqbolli ekanligi aniqlandi. Sintez jarayoni metanol ishtirokida olib borilganda asosan piridin sintez qilinadi. Katalizator o'zaklari sifatida kaolin (AKF-78 (K)), bentonit (Navbahor bentoniti (B)) va seolit tarkibli Karmana tog' jinslaridan (KTJ) foydalanilganda atsetilen, metanol va ammiakning kondensatsiyasida piridin 30-38%, α-P 22-25 %, β-P 10-13 % va γ-P 2-8 % hosil bo'lishi aniqlandi.

Asetilen kondensatsiyasi asosidagi piridin sintezi katalizatorlari 400⁰C haroratda quyidagi faollikni ko'rsatdi:

KRXKTJ-5>KRXB-5>KRXKTJ-7>KRXKTJ-3>KRXB-7>KRXK-5> KRXK-7.

Eng faol katalizator KRXKTJ-5 ishtirokidagi reaksiyalarda piridin va piridin hosililarining umumiy unumi 84%ni tashkil qildi. Karmana tog' jinsi katalizator o'zagi sifatida boshqalariga nisbatan asosiy mahsulot unumini oshirdi va u faol o'zak ekanligini tajribada aniqlandi.

Sintez jarayonida metanolning miqdori ortishi bilan β-Pikolin, metanoldan foydalanilmaganda esa α-P va γ-P hosil bo'lish unumi ortishi kuzatildi.

Metanolni katalitik degidrirlash jarayonida rux fosfat tuzi peptizatorligidagi katalizatorlarning faolligini oshirishi kuzatildi. Haroratning 350-400ºC ga ortishi bilan modifikasiyalangan tegishli katalizatorlarda metanolning degidrir-lashidan formaldegidga aylanishi va geterosiklanish jarayonlari tezlashadi. Ma'lumki mahsulot unumiga ta'sir etuvchi omillardan biri harorat hisoblanadi va jarayonga haroratning ta'siri ҳам o'rganildi va natijalari *3-jadvalda* keltirilgan.

3-jadval

Mahsulot unumiga haroratning ta'siri (C_2H_2:NH_3:CH_3OH nisbati = 1:2:1)

Katalizator tarkibi (%)	Harorat, °C	Katalizat tarkibi, %				
		C_5H_5N	α-P	β-P	γ-P	q. m.
ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 87 (RXK-10)	360	16	3	2	–	79
	380	20	5	4	–	71
	400	23	9	5-6	–	62
	420	23	8	5	–	64
	440	21	8	3	–	68
ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 87 (RXB-10)	360	17	3	2	–	78
	380	22	9	5	–	64
	400	25	12	5-6	–	57
	420	24	12	4	–	60
	440	22	11	3	–	64
ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 87 (RXKTJ-10)	360	17	6	2	–	75
	380	24	10	4	–	62
	400	26	13	5-6	2	55
	420	24	13	5	2	56
	440	22	12	4	2	60
CdO – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; kaolin – 82 (KRXK-5)	360	23	11	5	–	61
	380	28	17	8	–	47
	400	30	22	10	2-3	35
	420	28	23	9	2-3	37
	440	27	21	8	2	42
CdO – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; bentonit – 82 (KRXB-5)	360	27	16	5	–	52
	380	33	20	10	2	35
	400	36	23	12	3-4	25
	420	35	24	11	3-4	26
	440	34	22	9	3	32
CdO – 5; ZnO – 10; Cr_2O_3 – 3; KTJ – 82 (KRXKTJ-5)	360	27	17	7	4	45
	380	35	22	11	7	25
	400	38	25	12-13	8	16
	420	37	26	11	9	17
	440	37	23	10	7	23

Tadqiqotlarning ko'rsatishicha yuqori haroratlarda piridin va pikolinlarning unumi ortib borishi aniqlandi. Haroratning 400ºC cha ortishi bilan *CdO* va *ZnO* tarkibli ko'p funksiyali katalizatorlar asosan piridin va pikolinlar sintezi uchun selektiv ekanligi aniqlandi. Haroratning 400ºC ortishi mahsulotning unumiga sezilarli ta'sir ko'rsatmasligi va katalizatorning faol komponentlaridan *CdO* ning metal kadmiygacha qaytarilishi sababli katalizatorning faolligi kamayishi kuzatidi. Cr_2O_3 promotorligidagi *ZnO* saqlagan katalizatorlarda piridin va pikolinlarga nisbatan atsetonitril, diaminlar, efirlar, aldollanish reaksiyalari mahsulotlari, turli smola tuzilishli qo'shimcha moddalar hosil bo'lishi kuzatildi. Atsetilen, ammiak va metanolning bug' fazada katalitik kondensatsiyasi jarayonlari orqali piridin va pikolinlar sintez qilish uchun maqbul harorat 400ºC ekanligi aniqlandi.

Xulosa. Bug' fazada atsetilen va metanolning ammonolizidan piridin va piridin hosilalari sintezi uchun faol komponentlar saqlagan yangi turdagi katalizatorlar yaratildi. Katalizator o'zaklari sifatida Angren kaolinlari, Navbahor bentoniti va Karmana konidan olingan seolit tarkibli shaffof bo'lmagan jinslardan foydalanilgan. Yaratilgan katalizatorlarning solishtirma yuzasi, g'ovakliklarining o'rtacha o'lchami, mexanik mustahkamligi, sochma zichliglari o'rganildi. Mahsulot unumiga katalizator o'zaklari, katalizatorning faol komponentlari, reaksiyaning olib borish haroratlari ta'siri o'rganildi. Asetilen kondensatsiyasi asosidagi piridin sintezi katalizatorlari 400ºC haroratda quyidagi faollikni korsatdi: KRXKTJ-5> KRXB-5> KRXKTJ-7> KRXKTJ-3> KRXB-7> KRXK-5> KRXK-7. Eng faol katalizator KRXKTJ-5 ishtirokidagi reaksiyalarda piridin va piridin hosililarining umumiy unumi 84%ni tashkil qildi. Sintez jarayonida metanolning miqdori ortishi bilan β-Pikolin, metanoldan foydalanilmaganda esa α-P va γ-P hosil bo'lish unumi ortishi aniqlandi. Karmana tog' jinsi katalizator o'zagi sifatida boshqalariga nisbatan asosiy mahsulot unumini oshirdi va u faol o'zak ekanligini tajribada isbotlandi. Bug' fazada piridin va piridin hosilalari sintezining gipotetik mexanizmi taklif qilindi. Piridin va piridin hosilalari sintezi uchun maqbul harorat 400ºC ekanligi aniqlandi.

Bibliografik ro'yxat:

1. Zhang W. Enhanced selectivity in the conversion of acrolein to 3-picoline over bimetallic catalyst 4,6% Cu-1,0% Ru/HZSM-5(38) with hydrogen as carrier gas. React. Kinet. Mech. Catal, 2019, pp. 391-411.

2. Khattab T.A. A Review on Synthesis of Nitrogen-containing Heterocyclic Dyes for Textile Fibers. Egypt. J. Chem, 2018, No. 5, pp. 897-937.

3. Guido Gambacorta., Sharley James S and Ian R.Baxendale. A comprehensive review of flow chemistry techniques tailored to the flavours and fragrances industries, Beilstein J. Org. Chem, 2021, pp. 1181-1312.

4. Григорева Н.Г., Аглиуллин М.Р., Костылева С.А., Филиппова Н.А., Кутепов Б.И., Нама Нарендер. Мезопористые алюмосиликаты в синтезе п-гетероциклических соединений // Кинетика и катализ. – Т. 60. № 1. – М.: Наука, 2019. – С. 81-92.

5. Oluseyi A.K., Olanrewaju A., Pal M., Das S.K. Evaluation of Nigerian Source of Kaolin as a Raw Material for Mullite Synthesis, J. Chem, 2016, pp. 1571-1582.

6. Vajglova Zuzana., Kumar Narendra., Eranen Kari., Toivakka Martti and Murzin Dmitry Yu. Synthesis and Physicochemical Characterization of Shaped Catalysts of β and Y Zeolites for Cyclization of Citronellal. Ind. Eng. Chem. Res, 2019, pp. 18084-18096.

7. Eminov A.M., Jumanov Yu.Q., Umarov F.Sh., Sayfiddinov O.O. O'zbekiston kaolinlaridan foydalanish. Science and innovation international scientific journal, 2022, 22-27 betlar.

8. Farahani S.H., Alavi S.M. Improved performance of HZSM-5 for the ethylbenzene/xylene isomerization reaction under industrial operating conditions. Rsc Advances, 2017, pp. 34012-34022.

9. Zhang J., Zhang H., Yang X., Huang Z., & Cao W. Study on the deactivation and regeneration of the ZSM-5 catalyst used in methanol to olefins. Journal of Natural Gas Chemistry, 2011, No. 3, pp. 266-270.

10. Бочкарёв В.В., Волгина Т.Н. Перспективные процессы переработки метанола в органические продукты. Химическая промышленност сегодня. – № 3. – Москва: ООО «Химпром Сегодня», 2008. – С. 13-17.

11. Umrzokov A., Muhiddinov B., Ikramov A., Nurmonov S., Vapoyev H., Jumanov Yu. Gaz fazasida aldol-kondensatsiyalanish jarayonlariga modifikatsiya-langan alyumosilikat o'zakli katalizatorlarning katalitik faolligini o'rganish. Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi, 2024, 148-153 betlar.

12. Умрзоков А.Т., Мухиддинов Б.Ф., Икрамов А., Вапоев Х.М. Гетероген каталитик усулда ацетонитрил синтези. «Фан ва технологиялар тараққиёти» Илмий-техникавий журнал, 2023, № 4. 56-63 betlar.

13. Умрзоқов А.Т., Мухиддинов Б.Ф., Вапоев Х.М., Нурмонов С.Э. Алдол конденсацияланиш оркали акролеин синтези. ФарПИ ИТЖ, 2023, Т. 27, № 4. 203-212 betlar.

УДК 662.767:620.9:502.3

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.014

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА: ОБЗОР НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ

Мамедов Р.А.,
доцент кафедры
«Электрическая и энергетическая инженерия»
БГТУ, PhD

Узаков Г.Н.,
проректор
по научной работе и инновациям КГТУ,
д.т.н., профессор

Maqolada vodorod olishning zamonaviy usullari ko'rib chiqilib, so'nggi yillarda vodorod texnologiyalari sohasida olib borilgan tadqiqotlar tahlil qilingan. Asosiy e'tibor qayta tiklanuvchi energiya manbalari (quyosh, shamol va gidroenergiya)dan foydalanib olinadigan "yashil" vodorodga qaratilgan. Elektrolizyorlarni quyosh va shamol stansiyalari bilan bir qatorda, gidroelektrostansiyalardan ham quvvatlantirish imkoniyati qayd etilgan bo'lib, bu kombinatsiyalangan energetika tizimlari uchun muhimdir. Dunyo bo'yicha vodorodning 95 % dan ortig'i qazilma yoqilg'idan ishlab chiqariladi, ekologik toza vodorod ulushi esa 1 % dan oshmaydi. Ishqoriy elektroliz orqali yashil vodorodning tannarxi 4-6 USD/kg, qattiq oksidli elektrolizyorlar (SOEC) yordamida esa arzon qayta tiklanuvchi energiya manbalarida 2,5-3 USD/kg ni tashkil etadi. Texnologik tayyorgarlik darajasi (TRL), kapital (CAPEX) va ekspluatatsion (OPEX) xarajatlar, shuningdek, texnologiyalarni kengaytirish salohiyatiga taqqoslama tahlil o'tkazilgan. Vodorod texnologiyalarining past uglerodli iqtisodiyotga o'tishda yuqori salohiyatga egaligi ko'rsatib o'tilgan.

Kalit so'zlar: *yashil vodorod, suvni elektroliz qilish, qayta tiklanuvchi energiya manbalari, metanni bug'li konversiya qilish, ko'mirni gazifikatsiya qilish, biomassa gazifikatsiyasi, suvni fotoelektrli parchalanishi, past uglerodli iqtisodiyot, qattiq jismli elektrolizer, ishqoriy elektroliz, membranali elektroliz, dekarbonizatsiya.*

В статье рассмотрены современные методы получения водорода и проанализированы исследования последних лет в области водородных технологий. Основное внимание уделено «зелёному» водороду, получаемому с использованием возобновляемых источников энергии (солнечной, ветровой, гидроэнергии). Отмечена возможность питания электролизёров как от солнечных и ветровых станций, так и от гидроэлектростанций, что важно для комбинированных энергетических систем. Более 95 % мирового водорода производится из ископаемого топлива, а доля экологически чистого не превышает 1 %. Себестоимость зелёного водорода при щелочном электролизе составляет 4-6 USD/кг, при использовании твёрдотельных электролизёров (SOEC) - 2,5–3 USD/кг при дешёвой энергии ВИЭ. Проведён сравнительный анализ технологической готовности (TRL), капитальных (CAPEX) и эксплуатационных (OPEX) затрат, а также потенциала масштабирования технологий. Показан высокий потенциал водородных технологий в переходе к низкоуглеродной экономике.

Ключевые слова: *зеленый водород, электролиз воды, возобновляемые источники энергии, паровая конверсия метана, газификация угля, газификация биомассы, фотоэлектрическое расщепление воды, низкоуглеродная экономика, твердотельный электролизёр, щелочной электролиз, мембранный электролиз, декарбонизация.*

В мире на сегодняшний день наблюдается активный рост интереса к технологиям водородной энергетики. Это связано с глобальными вызовами, такими как изменение климата, необходимость декарбонизации экономики, обеспечение энергетической безопасности и диверсификация источников энергии. Водород всё чаще рассматривается как перспективный и экологически чистый энергоноситель будущего, способный играть ключевую роль в энергетическом переходе от ископаемых видов топлива к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) [1]. Страны Европейского союза, Япония, Китай, США и другие активно разрабатывают и внедряют национальные стратегии по развитию водородной экономики, что подтверждается ростом числа пилотных проектов, научных публикаций и инвестиций в соответствующую инфраструктуру.

На сегодняшний день водород используется в ряде промышленных отраслей – таких как нефтехимия, металлургия, производство удобрений. Однако основная часть «традиционного» водорода получается с использованием ископаемого топлива, прежде всего – метана, с сопутствующим выделением CO_2. Это так называемый «серый» водород, доля которого в мировом производстве составляет около 48 % [2].

В условиях экологических ограничений усиливается интерес к «зелёному» водороду – получаемому методом электролиза воды с использованием электроэнергии от ВИЭ. Такая технология обеспечивает практически нулевой углеродный след, но требует значительных затрат на оборудование и электроэнергию, что пока ограничивает её широкомасштабное применение [3].

Существует множество методов получения водорода, различающихся как по источнику энергии, так и по принципам технологического процесса. Наиболее изученными и коммерчески реализуемыми являются паровая конверсия метана, газификация угля и биомассы, электролиз воды. Кроме того, ведутся активные исследования в области термохимических циклов (например, с использованием ядерной или солнечной энергии), фотоэлектрохимического расщепления воды, биофотолиза и ферментативных процессов с участием микроорганизмов. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения с точки зрения энергоэффективности, экологической безопасности, уровень технологической готовности TRL (Technology Readiness Level) и уровня капитальных и эксплуатационных затрат CAPEX (Capital Expenditure) и OPEX (Operational Expenditure) [4].

Важным направлением научных исследований становится интеграция различных технологий с целью повышения общей эффективности и сокращения выбросов парниковых газов. Так, комбинированные подходы, включающие улавливание и хра-

нение углерода CCS (Carbon Capture and Storage) /CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) в традиционных процессах, использование высокотемпературного тепла от атомных или солнечных станций в термохимических циклах, а также сопряжение электролизёров с возобновляемыми источниками энергии, открывают возможности для снижения себестоимости и ускорения коммерциализации водорода. Дополнительное внимание уделяется вопросам стандартизации, созданию инфраструктуры транспортировки и хранения, а также разработке международных нормативов, обеспечивающих прозрачность «углеродного следа» и конкурентоспособность водородных технологий на глобальном рынке.

Цель исследования – проанализировать и обобщить современные научные подходы, технологические решения и экономические параметры различных методов получения водорода, с акцентом на экологически чистые (зелёные) технологии, а также выявить их преимущества, ограничения и перспективы развития в контексте перехода к низкоуглеродной энергетике.

Задачи исследования заключаются в классификации методов получения водорода, анализе их технологических и экономических характеристик, выявлении преимуществ и ограничений каждого подхода, а также в определении перспектив развития экологически чистых водородных технологий.

Классификация водорода и методов его получения.

Водород, как универсальный и экологически чистый энергоноситель, классифицируется не только по химическому составу, но и по способу его получения, что напрямую связано с уровнем выбросов парниковых газов и устойчивостью производственного процесса. Наиболее распространённой является цветовая классификация водорода, определяющая его «цвет» в зависимости от источника энергии и степени экологичности производства: *серый водород* получается из ископаемых углеводородов (паровая конверсия метана или газификация угля) без улавливания CO_2 – наиболее распространённый и наименее экологичный вариант.

Рис. 1. Распределение методов получения водорода по доле в мировом производстве

Синий водород производится аналогично серому, но с применением технологий для улавливания и хранения CO_2 – снижает углеродный след, но остаётся зависимым от ископаемого топлива. *Зелёный водород* образуется путём электролиза воды с использованием электроэнергии из возобновляемых источников и практически не оставляет углеродного следа [5].

В настоящее время около 48 % мирового объёма водорода производится с помощью паровой конверсии метана, 30 % – в результате процессов нефтепереработки, 18 % – путём газификации угля и биомассы, и лишь около 4 % – посредством электролиза воды [6]. На *рис. 1* приведена диаграмма, отображающая долю основных методов получения водорода в мировой структуре производства.

Методы получения водорода можно классифицировать также по типу используемой энергии и характеру протекающих процессов. Современная научная литература выделяет следующие ключевые направления:

1. Термохимические методы – основаны на высокотемпературных реакциях с использованием тепловой энергии, в том числе процессов пиролиза, паровой конверсии, газификации угля и биомассы.

2. Электрохимические методы, в первую очередь электролиз воды, могут быть реализованы с различными типами щёлочных электролизёров PEM (Proton Exchange Membrane Electrolysis), SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) и широко применяются при производстве «зелёного» водорода.

3. Фотоэлектрохимические методы используют энергию света для разложения воды на водород и кислород с помощью специальных полупроводниковых материалов. Эта технология находится на ранних стадиях развития, но демонстрирует высокий потенциал.

4. Биологические методы, включающие биофотолиз, ферментативные и микробные процессы, предполагают участие водорослей, бактерий и ферментов для выделения водорода в результате метаболических реакций [7].

На *рис. 2* представлена классификация методов получения водорода по типу энергии и характеру процессов, включающая четыре основных направления: термохимический, электролизный, фотоэлектрохимический и биологический методы.

Обзор современных методов получения водорода.

Паровая конверсия метана.

Паровая конверсия метана является наиболее широко используемым промышленным методом получения водорода, на который

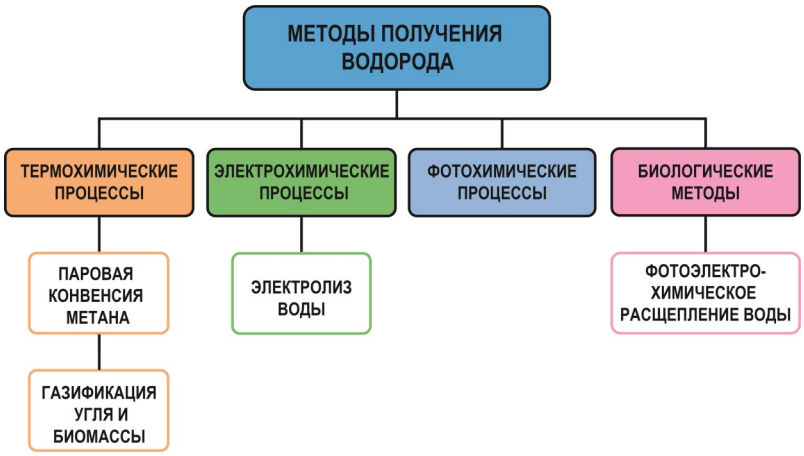


Рис. 2. Классификация методов получения водорода

приходится около 48-50 % мирового производства. В этом процессе природный газ (главным образом метан) реагирует с перегретым водяным паром при температуре 700-1000ºC в присутствии никелевого катализатора, в результате чего образуются водород, угарный газ и углекислый газ. Этот метод отличается высокой энергоэффективностью (до 70 %) и относительно низкой себестоимостью, однако сопровождается значительными выбросами CO_2, что ограничивает его экологическую устойчивость.

Газификация угля и биомассы.

Газификация представляет собой термохимическое превращение твёрдого углеродсодержащего сырья (угля, биомассы) в синтез-газ, состоящий из H_2, CO и CO_2, путём нагрева в ограниченном количестве кислорода. Процесс происходит при температуре 900-1200ºC. Газификация угля используется преимущественно в регионах с обширными угольными ресурсами, однако сопровождается высокими выбросами углерода. Использование биомассы как сырья позволяет снизить углеродный след, обеспечивая нейтральный углеродный баланс [8].

Электролиз воды.

Электролиз воды – экологически чистый метод получения водорода, при котором под действием электрического тока вода разлагается на водород и кислород. Существует несколько типов электролизёров:

Щёлочной электролиз использует водный раствор щёлочи (KOH, NaOH) и является самым зрелым и дешёвым методом.

PEM-электролиз (протон-обменная мембрана) обеспечивает более высокую плотность тока и динамичность, но требует дорогих материалов (платина, иридий).

SOEC (твёрдооксидный электролиз) работает при высоких температурах (600-850ºC), достигая высокого КПД, но находится на стадии разработки [9]. Электролиз считается ключевым методом получения зелёного водорода при условии использования энергии ВИЭ.

Фотоэлектрохимические и фотокаталитические процессы.

Фотоэлектрохимические методы основаны на использовании солнечного света для активации полупроводникового фотоэлектрода, разлагающего воду. Фотокатализ подразумевает использование света для возбуждения катализатора (обычно оксидов металлов), способствующего реакции водоразложения. Эти технологии находятся на стадии активных исследований и обладают высоким потенциалом для устойчивого водородного производства, однако пока характеризуются низким КПД (менее 10 %) и нестабильностью материалов.

Биологические методы.

Биологические процессы получения водорода включают:

Фотобиологический водород – получение H_2 из воды с использованием фотосинтезирующих микроорганизмов (зелёные водоросли, цианобактерии).

Темновой ферментативный водород – продуцирование водорода анаэробными бактериями в отсутствие света.

Биофотолиз – расщепление воды с помощью биокатализаторов на основе ферментов. Эти технологии экологичны, но имеют ограничения по масштабируемости, скорости выхода и чувствительности к условиям среды.

Новейшие методы: пиролиз, термолиз, плазмолиз.

Современные разработки включают инновационные подходы:

Пиролиз метана – термическое расщепление CH_4 без кислорода при температуре свыше 1000ºC с образованием H_2 и твёрдого углерода. Метод потенциально безуглеродный.

Термолиз воды – прямое термическое разложение H_2O при температуре >2000ºC, требует значительной энергии и специальных материалов.

Плазмолиз – использование высокотемпературной плазмы для расщепления молекул воды или углеводородов. Подобные методы находятся на ранних стадиях коммерциализации, но демонстрируют перспективу в контексте будущих низкоуглеродных производств водорода [10].

Сравнительный анализ методов получения водорода.

Современные технологии получения водорода различаются по энергетической эффективности, экономическим показателям, степени зрелости и экологической устойчивости. Наиболее изученные и масштабно применяемые методы – это паровая конверсия метана (SMR), газификация угля, электролиз воды, а также новые и перспективные фотохимические и биологические технологии.

Энергетическая эффективность.

Паровая конверсия метана SMR (Steam Methane Reforming) демонстрирует высокий КПД – около 65-75 %, что объясняет её широкое применение в промышленности. Газификация угля обеспечивает КПД порядка 45-55 %, но сопровождается высокими выбросами CO_2. Электролиз воды имеет более низкую эффективность – от 50 до 70 % в зависимости от технологии: щёлочной AEL (Alkaline Electrolysis), PEM или твёрдокислотный электролиз (SOEC). Фотоэлектрохимические и фотокаталитические методы пока достигают лишь 1-10 % эффективности, но обладают значительным потенциалом при дальнейшей оптимизации. Биологические методы также остаются малопроизводительными, с КПД менее 10 %.

Себестоимость производства LCOH (Levelized Cost of Hydrogen)

На 2024 год наименьшую стоимость демонстрирует водород из ископаемого топлива: SMR без улавливания углерода – 1,0-2,0 *USD/кг*. Электролиз на базе ВИЭ – 3,0-6,0 *USD/кг*, в зависимости от региона и источника энергии. Фотохимические и биологические методы пока значительно дороже – свыше 10 *USD/кг*, что обусловлено низким выходом продукции и дороговизной катализаторов.

Уровень технологической готовности (TRL).

Методы SMR и газификации имеют TRL = 9 и полностью освоены в промышленности. Щёлочной и PEM-электролиз находятся на уровне TRL = 7-9, активно внедряются в рамках водородных стратегий ЕС, Китая и Японии. SOEC находится на стадии демонстрации (TRL = 5-7). Фотоэлектрохимические и биологические методы имеют TRL = 3-5, требуют фундаментальных исследований и масштабируемых решений.

Экологические аспекты.

Наименее экологичными остаются углеродоёмкие методы – SMR и газификация без систем улавливания углерода (CCUS). Электролиз с применением ВИЭ даёт «зелёный» водород и практически не сопровождается выбросами CO_2. Фото- и биометоды также потенциально безуглеродны, но нуждаются в снижении ресурсоёмкости и токсичности катализаторов.

Перспективы масштабирования.

SMR обладает наибольшей инфраструктурной готовностью, однако в условиях энергетического перехода теряет приоритет. Электролиз становится ключевым направлением водородной экономики при условии удешевления ВИЭ и электролизёров. Фотоэлектрохимические и биологические методы потенциально интересны для децентрализованного производства, однако требуют научных прорывов и технологической доработки.

Анализ современных научных подходов.

Проанализированы научно-исследовательские публикации и инженерно-технические решения, отражающие мировой и национальный опыт разработки и совершенствования методов получения водорода с использованием как традиционных, так и возобновляемых источников энергии, с акцентом на их эффективность, экологичность и масштабируемость:

А. Курчио и др. выполнили технико-экономический анализ водородных технологий на основе электролиза воды, включая щёлочную технологию электролиза воды AWE (Alkaline Water Electrolysis), протон-обменный (PEM) и твёрдооксидный (SOEC) электролиз, с акцентом на использование возобновляемых источников энергии.

При стоимости электроэнергии менее 30 *$/МВт·ч* себестоимость зелёного водорода составляет 3,5-6,0 *$/кг*, с прогнозируемым снижением до <1,5 *$/кг* к 2035 году при масштабировании. Электролизёры обеспечивают производительность 10-100 *кг H_2/сут* при мощности 50-500 *кВт*. Энергоэффективность PEM-систем составляет 65-75 %, у SOEC – до 80 % за счёт рекуперации тепла. Капитальные затраты оцениваются в 900-1600 *$/кВт*, срок окупаемости – 8-12 лет. Учтены также расходы на водоподготовку, сжатие и инфраструктуру. Авторы подчёркивают высокую чувствительность экономики к тарифам на электроэнергию и необходимость значительных инвестиций в сеть [11].

А. Гасеми и др. (2024) провели обзор технико-экономических и экологических аспектов разных методов производства зелёного водорода из биомассы, включая термохимические (газификация, паровой риформинг), биологические (тёмное брожение) и электропроводные (электрохимические) процессы. Газификация обеспечивает наибольший выход: при влажной или сухой древесной биомассе эффективность холодной газификации достигает ~60 %, производство водорода около 10-50 *кг/т* сырья.

Биологический метод менее энергоёмкий, но имеет низкую производительность (~1-5 *кг H_2/т/день*). Экономическая оценка показала, что стоимость производства водорода колеблется от ~2,5 до 6 *€/кг* в зависимости от метода и региональных условий, TRL термохимических методов выше, чем у биологических или электрохимических. Степень готовности технологии (TRL) у газификации – около 7-9, у биологических методов – 5-6. Экологический анализ выявил снижение выбросов CO_2 до 40-60 % в сравнении с серыми технологиями. Среди преимуществ – высокая масштабируемость и потенциал использования отходов. Основным недостатком является необходимость предварительной подготовки сырья и высокие CAPEX при строительстве газификаторов (~2-5 млн €/установка) [12].

Фриден и др. (2024) выполнили количественный метаанализ 89 научных работ, содержащих 832 прогноза по уровню приведённой стоимости водорода (LCOH) при производстве с использованием электролиза на основе возобновляемых источников энергии. По их оценкам, в базовом сценарии средняя стоимость водорода в 2020 г. составляла около 5,3 *€/кг*, с прогнозным снижением до 4,4 *€/кг* к 2030 году и до 2,7 *€/кг* к 2050 году. При этом региональные и технологические различия приводят к значительной вариативности: в ряде азиатских стран ожидается достижение 1,8 *€/кг* к середине века, а щёлочной электролиз (AWE) демонстрирует потенциал до ~2,0 *€/кг*, что делает его наиболее перспективной технологией в долгосрочной перспективе. Авторы отмечают тенденцию к снижению стоимости более чем на 60 % за период 2010-2022 гг. и предлагают линейные траектории уменьшения затрат, применимые для сценарного моделирования. К достоинствам работы относится масштабный охват публикаций и систематизированная оценка тенденций, однако высокая разнородность исходных допущений и методологий между источниками ограничивает точность экстраполяции данных для отдельных регионов и условий [13].

Францманн и др. (2023) выполнили пространственно-временной анализ и сценарное моделирование потенциала производства зелёного водорода в 28 странах до 2050 года. С учётом доступных солнечных и прибрежных ветровых ресурсов, годовой теоретический потенциал производства водорода достигал 1500 *ПВт·ч*, по низшей теплоте сгорания, LHV (Lower Heating Value). Из этого объёма, порядка 79 *ПВт·ч* LHV может быть произведено с удельной стоимостью ниже 2,30 *€/кг* к 2050 году. Расчёты показали, что децентрализованные электролизные установки на солнечной энергии часто экономически предпочтительнее даже в ветроэнергетических регионах. Влияние водоснабжения на стоимость производства водорода оказалось незначительным. Прогнозируемые дополнительные затраты на импорт из демократически стабильных стран выше лишь на 7 %, что делает их стратегически привлекательными с точки зрения энергетической безопасности. Авторы подчёркивают значительный потенциал регионов с высоким уровнем инсоляции (Африка, Ближний Восток) для дешёвого производства зелёного водорода. Основное преимущество исследования – комплексный геоэнергетический подход, однако остаются риски, связанные с доступностью устойчивых водных ресурсов и инфраструктурой для водоснабжения [14].

Лью и др. (2023) предложили комплексную модель высокотемпературного непрерывного электролиза воды (SOEC) с интеграцией тепла и подключением к супергридам для оптимизации затрат производства зелёного водорода. Устройство рассчитано на производство 5000 *кг H_2/сут*, при этом внешняя потребность в тепле снижается с 29,9 *МВт* до 1,8 *МВт* после оптимизации температуры. Приведённая стоимость водорода (LCOH) составила 3,60 *$/кг* при тепловой интеграции, 2,59 *$/кг* при подключении к супергридам и 2,18 *$/кг* при техническом прогрессе в SOEC. Авторы прогнозируют снижение LCOH до примерно 1,40 *$/кг* к 2035 году, что делает технологию конкурентоспособной с традиционными методами производства. Энергоэффективность системы превышает 80 %, благодаря рекуперации тепла и оптимизации плотности тока. Плюсом является значительное снижение операционных расходов при масштабировании и высокий потенциал интеграции с существующими инфраструктурами. Основным недостатком являются деградация материалов при высокотемпературной эксплуатации и необходимость дорогостоящего управления тепловыми потоками в крупномасштабной реализации [15].

Вуппалададийам и др. (2022) выполнили детальный обзор современных технологических решений пиролиза биомассы, направленных на получение зелёного водорода. Авторы классифицируют процессы на традиционные, каталитические, микроволновые и интегрированные методы. Эффективность преобразования биомассы в синтез-газ достигает 40-70 % (в пересчёте на низшую теплоту сгорания – LHV), при этом выход водорода составляет от 5 до 50 *кг/т* сухой массы, в зависимости от применяемой технологии. Рассматриваются инновационные подходы – инлайн-каталитический пиролиз, микроволновой нагрев, гидропиролиз и ко-пиролиз, позволяющие улучшить состав синтез-газа и увеличить долю водорода. Среди преимуществ данного метода – возможность переработки отходов аграрного и промышленного происхождения, высокая технологическая гибкость при совмещении с газификацией, а также потенциальная масштабируемость. Экономические расчёты показывают себестоимость производства водорода в пределах 2,5-4 *€/кг*, причём применение комбинированных технологий снижает капитальные и эксплуатационные издержки. Вместе с тем, основными ограничениями являются высокая энергоёмкость процесса и необходимость тщательной подготовки сырья, что увеличивает логистические и операционные расходы при промышленной реализации [16].

Кастро и др. (2022) провели моделирование и технико-экономическую оценку процессов получения зелёного водорода из газификации древесной биомассы с дальнейшей очисткой синтез-газа. Используя программное обеспечение Aspen Plus, они смоделировали различные схемы газификации с последующей очисткой, включая реакцию водяного газа и улавливание CO_2. Энергоэффективность процесса (cold gas efficiency) достигает 60-65 %, а содержание водорода в синтез-газе – 30-50 % по объёму, в зависимости от типа газификатора и режима работы. Выход водорода составляет около 25-40 *кг/т* сухой древесной биомассы. Приведённая стоимость водорода (LCOH) оценивается в диапазоне 2,0-4,0 *USD/кг*, с потенциалом снижения при оптимизации конфигурации процесса. Значительное влияние оказывает качество сырья и эффективность очистки газа – модели показали, что интеграция

газификации и процессов доочистки повышает выход H_2 на 10-15 % и снижает содержание примесей. Среди преимуществ – использование местной древесной биомассы, масштабируемость и возобновляемость сырья. Основными недостатками являются высокие капитальные затраты (CAPEX – capital expenditures) и эксплуатационные расходы (OPEX – operational expenditures), обусловленные необходимостью подготовки сырья и усложнением схем очистки [17].

Азиз и др. (2021) рассмотрели способы получения водорода из биомассы и органических отходов. Основное внимание уделено термохимическим методам (газификация, пиролиз), обеспечивающим высокий выход водорода – 5-50 *кг/т* при эффективности до 60 %. Биологические процессы (тёмное и световое брожение) менее продуктивны – 1-5 *кг/т*, но перспективны для маломасштабных решений. Стоимость водорода варьирует от 1,2 до 4 *$/кг*, в оптимальных условиях – 1,5-2,5 *€/кг*. Термохимические технологии достигли стадии промышленной готовности, тогда как биологические ещё развиваются. Авторы подчёркивают экологические преимущества и необходимость снижения энергозатрат и решения логистических проблем [18].

Х.С. Ахмадов и др. (2024) предложили и проанализировали экономическую целесообразность производства зелёного водорода в Узбекистане с использованием солнечного термохимического реактора, основанного на концентрированной солнечной энергии. Исследование охватило пять регионов республики, показав минимальные затраты в Ташкенте – всего 1,20 *USD/кг* H_2 при подключении инвесторов. Без привлечения инвестиций LCOH составляет 1,25-2,00 *USD/кг*, включая инфраструктуру и эксплуатационные расходы. Привлечение инвесторов обеспечивает среднюю прибыль на уровне 0,35 *USD/кг*. Авторы подчеркивают, что такая себестоимость делает производство водорода в Узбекистане конкурентоспособным при условии масштабирования и государственной поддержки. Используемая модель предусматривает учет эффективности солнечных установок и инфраструктурных факторов, однако ограничение метода заключается в зависимости от количества солнечной радиации и инвесторской готовности в регионах с менее благоприятными условиями [19].

Б.Б. Алиханов и др. (2023) представили концептуальную модель энергетической безопасности, основанную на использовании водорода как ключевого энергоносителя в Узбекистане и регионах без развитой инфраструктуры. Авторы предлагают автономный гибридный комплекс для производства экологически чистого водорода с использованием возобновляемых источников энергии – солнечных и ветровых установок – в сочетании с хранением и распределением H_2. Экономические расчёты показывают, что себестоимость водорода может быть конкурентоспособной при автономной работе в районах, лишённых централизованной энергетической инфраструктуры. Модель включает технические компоненты такие как солнечные панели, ветрогенераторы, электролизёры и системы хранения, адаптированные к условиям отдалённых регионов.

Основным преимуществом является повышение энергетической безопасности и снижение зависимости от ископаемых ресурсов. Недостатком предложенного подхода является высокая капитальная стоимость автономного комплекса и необходимость инвестиций в хранение и транспорт водорода в удалённых районах [20].

Проблемы и ограничения.

Несмотря на технологические достижения в области получения водорода из возобновляемых источников энергии, существует ряд существенных ограничений, сдерживающих широкое распространение данных технологий. Одной из ключевых проблем остаётся высокая капиталоёмкость установок – особенно термохимических и фотоэлектрохимических систем, требующих сложной инфраструктуры, включая солнечные концентраторы, материалы, устойчивые к высоким температурам, и системы управления тепловыми потоками. Кроме того, низкая плотность энергии солнечного излучения в зимние периоды в регионах с континентальным климатом (например, в некоторых областях Узбекистана) ограничивает круглогодичную эффективность таких систем.

Другим значительным ограничением является низкий уровень технологической готовности (TRL) для большинства передовых технологий «зелёного» водорода, особенно в условиях развивающихся стран. Например, термохимические циклы на основе оксидов металлов или серо-йодного цикла находятся на стадии лабораторных и пилотных установок, что затрудняет их масштабирование. Кроме того, в странах с ограниченным доступом к международным инвестициям и современному оборудованию наблюдается нехватка кадров и нормативной базы для эффективной интеграции водородных систем в существующую энергетическую инфраструктуру. Также остаётся нерешённым вопрос долговременного хранения и транспортировки водорода с минимальными потерями энергии и безопасностью на всех этапах жизненного цикла.

Перспективы развития технологий

В ближайшие десятилетия ожидается активное развитие технологий получения водорода, ориентированных на повышение энергоэффективности и снижение удельной стоимости производимого топлива. Особое внимание уделяется электролизу воды с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности солнечных и ветровых электростанций. Повышение технологической готовности твердокислотных электролизёров (SOEC), а также совершенствование мембранных систем в PEM-электролизёрах открывают возможности для масштабируемого и экологически чистого производства водорода с минимальными выбросами парниковых газов. Внедрение цифровых решений и автоматизации управления процессами дополнительно способствует снижению эксплуатационных затрат.

Одним из перспективных направлений также являются фотокаталитические и термохимические циклы, способные эффективно использовать солнечное тепло при высокой температуре. Несмотря на то, что данные методы пока находятся на стадии лабораторных и пилотных испытаний, их развитие может обеспечить прорыв в технологии дешёвого и устойчивого получения водорода. Кроме того, усилия мирового научного сообщества направлены на снижение зависимости от критически важных материалов (например, платины и иридия), что позволит удешевить оборудование и ускорить коммерциализацию «зелёного» водорода. В долгосрочной перспективе водородные технологии играют ключевую роль в обеспечении энергетического перехода, декарбонизации промышленных секторов и транспорта.

Заключение.

Результаты проведённого обзора подтверждают, что в настоящее время технологии получения водорода находятся на стадии интенсивного развития, охватывая широкий диапазон методов - от термохимических процессов до инновационных низкоуглеродных и безуглеродных технологий. Наибольший потенциал для формирования устойчивой водородной энергетики имеют «зелёные» методы, в первую очередь электролиз с использованием возобновляемых источников энергии.

Перспективы дальнейшего развития связаны с повышением эффективности технологических процессов, снижением удельных капитальных (CAPEX) и эксплуатационных (OPEX) затрат, а также масштабированием производственных мощностей. Решение указанных задач требует комплексной интеграции научно-технических достижений, инвестиционной поддержки и развития нормативно-технической базы. Таким образом, широкое внедрение экологически чистых технологий получения водорода способно внести значительный вклад в декарбонизацию экономики и обеспечение глобальной энергетической безопасности.

Библиографический список:

1. Smith J., Brown T., Lee M. Global trends in hydrogen energy: pathways for decarbonization and sustainable energy transition. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, Vol. 48(12), pp. 15-20.

2. Johnson P., Wang Y., Müller K. Current status and challenges of gray hydrogen production. Energy Reports, 2022, Vol. 8, pp. 102-107.

3. Ahmed S., Patel R., Kim D. Green hydrogen from water electrolysis powered by renewable energy: technological and economic review. Renewable Energy, 2021, Vol. 175, pp. 55-60.

4. Zhao X., Kumar A., Ivanov I. Comparative analysis of hydrogen production methods: efficiency, cost, and environmental impact. Applied Energy, 2024, Vol. 355, pp. 22-29.

5. Bell R., Tanaka K., Fischer L. Blue hydrogen: carbon capture and storage integration with steam methane reforming. Journal of Cleaner Production, 2022, Vol. 368, pp. 40-45.

6. IEA. Global Hydrogen Review 2023. International Energy Agency, Paris, 2023, pp. 88-93.

7. Millet P., Grigoriev S., Fateev V. Water electrolysis technologies for green hydrogen production: Current status and future trends. Electrochimica Acta, 2022, Vol. 420, pp. 301-308.

8. Hisatomi T., Domen K. Introduction of solar water splitting via photocatalysis and photoelectrochemistry. Nature Catalysis, 2019, Vol. 2, pp. 112-118.

9. Hallenbeck P.C., Ghosh D. Advances in fermentative biohydrogen production: The way forward. Trends in Biotechnology, 2020, Vol. 38(1), pp. 77-84.

10. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008, pp. 650-658.

11. Curcio, E., Morea, D., Ghenai, C., et al. Techno-economic analysis of hydrogen production: Costs, policies, and scalability in the transition to net-zero. Energies, 2025, 18 (4), 1-12.

12. Ghasemi A., Nikafshan H., Akrami M. Biomass to green hydrogen: A review of techno-economic environmental assessment of various production methods. Hydrogen, 2024, 5 (3), pp. 474-493.

13. Frieden, D., Leker, J., et al. Future costs of hydrogen: A quantitative review. Sustainable Energy & Fuels, 2024, 8, pp. 1806-1822.

14. Franzmann, D., Heinrichs, H., Lippkau, F., Addanki, T., Winkler, C., Buchenberg, P., Hamacher, T., Blesl, M., Linßen, J., Stolten, D. Green hydrogen cost potentials for global trade. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(85), , pp. 33062-33076.

15. Liu H., Clausen L. R., Wang L., Chen M. Pathway toward cost-effective green hydrogen production by solid oxide electrolyzer. Energy & Environmental Science, 2023, Vol. 16, pp. 2090-2111.

16. Vuppaladadiyam, A. K.; Vuppaladadiyam, S. V.; Awasthi, A.; Sahoo, A. Biomass pyrolysis: A review on recent advancements and green hydrogen production. Bioresource Technology, 2022, Vol. 364, Article 128087, pp. 1-28.

17. Castro, J.; Leaver, J.; Pang, S. Simulation and Techno-Economic Assessment of Hydrogen Production from Biomass Gasification-Based Processes: A Review. Energies, 2022, Vol. 15(22), Article 8455, pp. 1-28.

18. Aziz M., et al. Hydrogen production from biomasses and wastes: A technological review. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, Vol. 46, Issue 68, pp. 33756-33781.

19. Akhmadov Kh. S., Nazarova N. M., Juraev A. R., Avezov I. Y. Technical and economic analysis, calculation and justification of hydrogen production through solar thermochemical reactor in Republic of Uzbekistan. E3S Web of Conferences, 2024, Vol. 497. pp. 1-6.

20. Alikhanov, B. B.; Abdullaev, A. K.; Isaev, R. I.; Iskandarov, Z. S. Energy Security Paradigm: Hydrogen Is the Main Energy Carrier of the XXI Century. European Journal of Research, Vol. 8, No. 3, 2023, pp. 1-15.

УДК 621.036

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.015

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ



Султонов А.Н.,
главный конструктор
АО «НГМК»

Эгамбердиев И.П.,
профессор кафедры
«Технология машиностроения»
НГГТУ, д.т.н.

Ашуров Х.Х.,
докторант кафедры
«Технология машиностроения»
НГГТУ

Tadqiqot ishida konchilik va metallurgiya sanoatida qo'llaniladigan barabanli sharli tegirmonlarning yuklash qurilmalarining ekspluatatsion ishonchliligi va samaradorligini oshirish muammolari ko'rib chiqilgan. An'anaviy konstruksiyalar o'zgaruvchan fraksion va namlik xususiyatlariga ega bo'lgan yuqori abraziv rudalarni zamonaviy qayta ishlash talablariga to'liq javob bermasligi ko'rsatilgan. Ilmiy-texnik tahlillar asosida metall sarfini kamaytirish, yeyilishga chidamliligini oshirish va texnik xizmat ko'rsatishning mehnat sarfini kamaytirishga yo'naltirilgan yuklash uzelining takomillashtirilgan konstruksiyasi ishlab chiqildi. Sanoat aprobatsiyasi o'tkazilib, taklif etilgan yechimning samaradorligi tasdiqlandi. Ish natijalaridan maydalash uskunalarini loyihalash va modernizatsiya qilishda foydalanish mumkin.

Kalit so'zlar: *barabanli sharli tegirmon; yuklash qurilmasi; yeyilishga chidamlilik; abraziv ta'sir; metall sig'imi; ekspluatatsion ishonchlilik; rudani qayta ishlash; uskunalarni modernizatsiyalash.*

В работе рассмотрены проблемы повышения эксплуатационной надёжности и эффективности загрузочных устройств барабанных шаровых мельниц, применяемых в горнодобывающей и металлургической промышленности. Показано, что традиционные конструкции не в полной мере удовлетворяют требованиям современной переработки высокоабразивных руд с переменными фракционными и влажностными характеристиками. На основе научно-технического анализа разработана усовершенствованная конструкция загрузочного узла, ориентированная на снижение металлоёмкости, повышение износостойкости и снижение трудоёмкости технического обслуживания. Проведена промышленная апробация, подтвердившая эффективность предложенного решения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и модернизации оборудования измельчения.

Ключевые слова: *барабанная шаровая мельница; загрузочное устройство; износостойкость; абразивное воздействие; металлоёмкость; эксплуатационная надёжность; переработка руды; модернизация оборудования.*

Современные технологии измельчения минерального сырья характеризуются стремительным развитием и возросшими требованиями к энергоэффективности, надёжности и производительности оборудования на всех этапах переработки. Барабанные шаровые мельницы остаются ключевым звеном технологических линий тонкого и сверхтонкого измельчения, особенно при переработке твёрдых, абразивных и трудноизмельчаемых пород. Надёжность работы и эффективность эксплуатации данных агрегатов во многом зависят от конструктивного совершенства и технического состояния их основных функциональных узлов. Особое значение при этом приобретает загрузочное устройство, обеспечивающее равномерную и бесперебойную подачу исходного материала в зону помола. Нарушения в его работе приводят к снижению производительности, неравномерной загрузке барабана и ускоренному износу рабочих элементов, что в конечном итоге негативно сказывается на общем ресурсе оборудования и качестве готового продукта.

Загрузочное устройство барабанной шаровой мельницы, несмотря на кажущуюся конструктивную простоту, представляет собой один из наиболее ответственных с точки зрения эксплуатационной надёжности и ресурсоёмкости обслуживания узлов агрегата. Оно должно обеспечивать стабильную, равномерную подачу рудной массы в рабочую камеру, предотвращать её переизбыток или выброс за пределы корпуса, а также исключать возможность попадания материала в опорно-вращательные узлы, что способно привести к их ускоренному износу и преждевременному выходу из строя. Кроме того, конструкция загрузочного узла должна сохранять требуемые прочностные и износостойкие характеристики при воздействии динамически переменных нагрузок, абразивного износа и температурных флуктуаций в условиях интенсивной эксплуатации. Любое нарушение в его функционировании нередко вызывает вынужденные остановки оборудования, что влечёт за собой существенное снижение производственной эффективности, увеличение затрат на ремонтно-восстановительные работы, а также рост временных потерь, связанных с простоем технологической линии.

Проблема надёжности функционирования загрузочного узла особенно актуализируется при переработке высокоабразивных руд переменной крупности, характерных для месторождений, содержащих золотосодержащие компоненты. В подобных условиях технологический процесс характеризуется непрерывным режимом эксплуатации мельничных агрегатов, что обуславливает повышенные требования к износостойкости, технологической устойчивости и ремонтопригодности конструктивных элементов. Стандартные исполнения загрузочных устройств, применяемые в данных условиях, зачастую не соответствуют эксплуатационным требованиям: они подвержены интенсивному абразивному износу, отличаются ограниченным сроком службы, требуют частого и трудоёмкого технического обслуживания, а также не обеспечивают стабильной пропускной способности при переменной влажности,

плотности и гранулометрическом составе рудной массы. Это влечёт за собой снижение эффективности помольного процесса, рост энергозатрат и увеличение простоев оборудования, критически влияя на общую производительность предприятия.

Результаты научно-технического анализа свидетельствуют о том, что традиционные подходы к проектированию загрузочных узлов барабанных мельниц не в полной мере учитывают комплекс взаимосвязанных механических, гидродинамических и эксплуатационных факторов, оказывающих определяющее влияние на эффективность процесса измельчения.

Многие из существующих конструктивных решений либо отличаются избыточной металлоёмкостью, увеличивая массу и стоимость оборудования, либо обладают низкой ремонтопригодностью, затрудняющей проведение технического обслуживания в условиях действующего производства, либо демонстрируют низкую эффективность при работе с конкретными типами руд, особенно характеризующихся нестабильной гранулометрией и влаго-содержанием.

Эти обстоятельства обусловливают необходимость комплексного пересмотра геометрических и конструктивных параметров загрузочного узла с целью повышения его эксплуатационной надёжности, ресурсоёмкости и адаптивности к переменным условиям подачи, при одновременном сохранении или увеличении производитель-ности агрегата.

В связи с изложенным, целью настоящего исследования является разработка и промышленная апробация усовершенствованной конструкции загрузочного устройства барабанной шаровой мельницы, ориентированной на комплексное повышение его эксплуатационной эффективности. Основное внимание уделяется решению следующих задач: повышение надёжности и устойчивости процесса загрузки материала, снижение интенсивности абразивного износа рабочих поверхностей, сокращение трудоёмкости и продолжительности регламентного технического обслуживания, а также оптимизация металлоёмкости конструкции без ущерба для её прочностных характеристик.

Предлагаемое конструктивное решение должно обеспечить стабильную работу мельницы в условиях переменной фракции и влажности перерабатываемого сырья, характерных для месторождений с труднообогатимыми золотосодержащими рудами.

Настоящая работа ориентирована на решение комплексной инженерной задачи, включающей в себя аспекты механики измельчения, повышения износостойкости конструкционных материалов, оптимизации геометрических параметров загрузочного узла, а также обеспечения технологической доступности и ремонтопригодности оборудования в условиях промышленной эксплуатации.

Исследование носит прикладной характер и направлено на практическое внедрение полученных результатов. Разработанные технические решения и методические подходы могут быть использованы на предприятиях горнодобывающей и металлургической отраслей, эксплуатирующих барабанные мельницы различного типоразмера и конструктивного исполнения, включая установки тонкого и сверхтонкого измельчения, работаю-щие в непрерывном режиме.

Исходное загрузочное устройство барабанной мельницы включало трёхсекционный наклонный склиз, жёстко закреплённый на тележке, и соединённый с загрузочным патрубком мельницы. Основные проблемы, выявленные при эксплуатации стандартного устройства:

– неравномерный абразивный износ по касательной линии падения руды;

– увеличение трудозатрат при выполнении технического обслуживания из-за ограниченного доступа;

– повышенная вероятность закупорки материала в зоне перехода склиза к цапфе;

– чрезмерная металлоёмкость конструкции, обусловленная избыточной массой.

С целью повышения эксплуатационных характеристик была разработана новая конструкция загрузочного устройства, предусматривающая следующие изменения:

1. Наклон питающего лотка: В продольном сечении лоток выполнен прямолинейно с углом наклона α = 40°. Такое геометрическое решение способствует гашению кинетической энергии падающей руды и снижению ударных нагрузок.

2. Поперечное сечение лотка: Выполнено в трапецеидальной форме, что обеспечивает более равномерное распределение рудной массы и предотвращает скапливание материала по краям.

3. Форма загрузочного бункера и кармана: Прямоугольный загрузочный бункер плавно переходит в цилиндрическую часть кармана, обеспечивая снижение сопротивления потоку руды, увеличение полезного пространства и устранение «узких» мест в патрубке.

4. Монтажные и ремонтные решения: Цилиндрическая часть лотка с минимальным зазором (5-7 *мм*) входит в отверстие кольца в цапфе, препятствуя проникновению руды внутрь узла. Конструкция обеспечивает быстрый демонтаж и замену узлов без необходимости разборки всей тележки.

Эффективность предложенных инженерных решений определя -лась по следующим критериям:

Износостойкость футеровки: Измерение остаточной толщины футеровки через равные интервалы времени (30, 60, 90 дней) с помощью ультразвукового толщиномера;

Расход мелющих шаров: фиксировалась масса шаров, затраченных на 1 *тонну* измельчённой руды, с коррекцией на вид помола (сухой/мокрый);

Надёжность подачи: учитывалось количество случаев закупорки загрузочного патрубка за период переработки 1000 *т* руды;

Трудоёмкость ремонтов: временные затраты на замену футеровки и ревизию составляющих фиксировались в нормо-часах;

Производственная производительность: измерялась часовая производительность мельницы до и после внедрения модернизированного устройства.

На *рис. 1* приведено загрузочное устройство барабанной мельницы.

Комплексное применение современных методов компьютерного моделирования – включая CAD-проектирование, численный анализ методом конечных элементов (FEM), дискретный анализ частиц (DEM) и CFD-моделирование — позволило на этапах цифровой верификации выявить оптимальные геометрические параметры устройства и оценить его поведение в условиях приближённых к реальным.

Конструктивные изменения загрузочного устройства обеспечили увеличение коэффициента равномерности подачи материала с 0,72 до 0,93, что является определяющим фактором равномерного износа футеровки мельницы и стабильности технологического процесса.

Результаты численного моделирования подтверждают, что перераспределение усилий в конструкции снижает локальные концентрации напряжений на 30-35 %, тем самым увеличивая надёжность работы мельницы при его длительной эксплуатации.

Изменение конструкции технологического кармана увеличивает пространство для прохода руды и обеспечивает свободный доступ рабочим при выполнении ремонтных работ.

Промышленные испытания модернизированного загрузочного устройства барабанной мельницы, позволили зафиксировать значительное улучшение эксплуатационных и технико-экономических характеристик оборудования.

Одним из ключевых достижений стало равномерное распределение абразивных нагрузок по поверхности питающего лотка, что позволило снизить уровень локального износа:

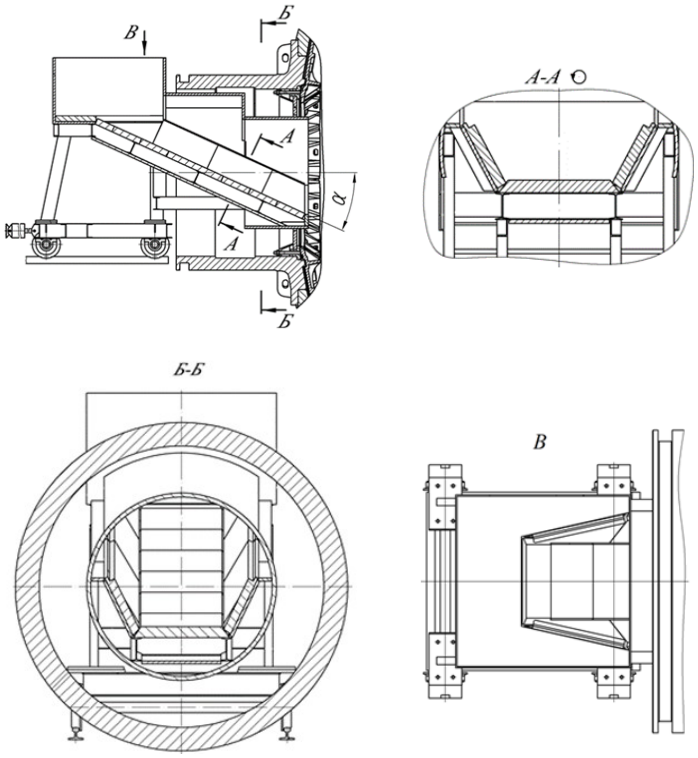


Рис. 1. Загрузочное устройство барабанной мельницы: *а – разрез профильной проекции загрузочного устройства; б – повернутый по перечный разрез (А-А) лотка; в – поперечный разрез (Б-Б) загрузочного устройства; г – вид В загрузочного устройства сверху*

Введённая цилиндрическая часть в зоне технологического кармана устранила эффект «ударной концентрации», типичный для прямоугольных переходов.

Ранее отмеченные проблемы с закупоркой и неравномерной подачей руды были решены благодаря геометрической оптимизации:

Увеличение площади поперечного сечения лотка на 22 % исключило застревание кусков крупной фракции;

Цилиндрический переход минимизировал турбулентность потока и повысил стабильность загрузки;

Зазор между патрубком и кольцом обеспечил защиту цапфы от попадания руды.

Благодаря эргономичной конструкции:

Доступ к ключевым узлам упрощён за счёт увеличенного пространства в зоне технологического кармана;

Среднее время на замену футеровки сокращено.

Упрощена схема демонтажа/монтажа тележки.

Таким образом, в результате изменения конструкции загрузочного устройства уменьшается металлоемкость загрузочного устройства, устраня-ется закупоривание руды на загрузочном патрубке, повышается надежность загрузки материалов в мельницу и сокращается трудоемкость ремонтных работ.

Изменение конструкции загрузочного устройства мельницы приводить к уменьшению динамической нагрузки от падений руды на подшипник скольжения, а также уменьшению времени простоя мельницы при проведении планово-предупредительного ремонта.

Разработанная конструкция загрузочного устройства барабанной мельницы может быть рекомендована как эффективное решение для модернизации существующего оборудования на предприятиях горнодобывающей, строительной и металлургической отраслей.

Внедрение представленного решения открывает возможности для создания интеллектуальных систем управления загрузкой и интеграции в цифровую модель производственной цепи горнодобывающей промышленности.

В результате проведённого исследования была решена комплексная инженерная задача, охватывающая вопросы механики измельчения, прочностной надёжности и технологической оптимизации загрузочного узла барабанной мельницы.

Разработанная конструкция обеспечивает равномерную подачу материала, снижает уровень абразивного износа и сокращает затраты на техническое обслуживание за счёт улучшенной геометрии и снижения металлоёмкости.

Практическая реализация предложенного решения в условиях непрерывной переработки высокоабразивных золотосодержащих руд подтвердила его эффективность и целесообразность дальнейшего внедрения на предприятиях горно-металлургического комплекса.

Библиографический список:

1. Елисеев М.П. Технологическое оборудование предприятий строительных материалов: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2018. – 512 с.

2. Киселёв И.В., Гончаров А.С. Анализ процессов измельчения в барабанных мельницах // Горный журнал. – № 5. – М.: Руда и Металлы, 2021. – С. 45-50.

3. Яковлев А.П., Новиков В.И. Повышение эффективности загрузки мельниц с использованием модифицированных устройств. Вестник машиностроения. – № 8. – М.: Машиностроение, 2022. – С. 92-98.

4. Потапов А.А., Шиманов К.Г. Моделирование движения частиц в технологических аппаратах. – СПб.: Политехника, 2017. – 284 с.

5. ГОСТ 27015-86. Машины и оборудование для переработки строительных материалов. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1986.

6. Rao T.C., Kumar A.K. Particle flow simulation and energy optimization in rotary mills // Powder Technology. 2021. – Vol. 384, pp. 1-9. DOI:10.1016/ j.powtec.2021.01.001.

7. Богданов О.С., Ненарокомов Ю.Ф., Олевский В.А. Справочник по обогащению руд. – М.: Недра, 1982. – 632 с.

8. Потураев В.Н., Сокур Н.И. Мельницы самоизмельчения. – М.: Недра, 1988. – 320 с.

9. Шинкоренко В.С., Белецкий Е.П., Ширяев А.А. Справочник по обогащению руд ч`рных металлов. – М.: Недра, 1980. – 540 с.

10. Донченко А.С., Донченко В.А. Справочник механика рудообогатительной фабрики. – М.: Недра, 1986. – 415 с.

11.Султонов А.Н., Жуманазаров А.Р., Бабакулов М.М., Троцко Ю.А. Загрузочное устройство барабанной мельницы: пат. IAP 856549, Республика Узбекистан; заявл. 17.12.2020.

12. Афанасьев В.Д., Бегун В.И. Загрузочное устройство мельницы самоизмельчения: пат. IAP 06390. Республика Узбекистан, опубл. 23.08.1981, Бюл. – № 31.

13. Шенаев В.М., Никурашин В.В., Кузин Е.А., Ямолова Н.И. Устройство загрузочное: пат. RU 2203739, Российская Федерация, опубл. 10.05.2003.

UO‘K 621.314 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.016

SINXRON GENERATORLARNING QO‘ZG‘ATISH TIZIMINI MATLAB/ SIMULINK VIRTUAL DASTURI YORDAMIDA MODELLASHTIRISH

Narzullayev B.Sh.,
NDKTU «Elektr energetikasi» kafedrasi dotsenti, PhD

Boboqulov J.S.,
NDKTU «Elektr energetikasi» kafedrasi assistenti

Bugungi kunda Respublikamizdagi turli iste’molchilarni uzluksiz elektr energiya bilan ta’minlashda sinxron turbogeneratorlar o‘rni alohida ahamiyat kasb etadi. Shuningdek ularni uzliksiz ishlashini ta’minlash bugungi kunning dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi. Shu boizdan sinxron turbogeneratorning elektr va mexanik parametrlarini muntazam ravishda monitoring qilish asosida ularning texnik holatini diagnostik tahlillar qilish orqali aniqlash lozim. Mazkur maqolada sinxron turbogeneratorlarning qo‘zg‘atish tizimnining 2 xil usuli Matlab/Simulink virtual dasturi yordamida modellashtirilib ularning diagnostik tahlili ko‘rsatilgan. Ushbu tahlillar asosida sinxron turbogeneratorning qo‘zg‘atish tizimini elektr va mexanik ko‘rsatkichlarini doimiy ravishda monitoring qilish imkoniyati mavjud bo‘ladi. Ushbu usulnining boshqa mavjud usullardan farqi shundaki, sinxron turbogeneratorlarining qo‘zg‘atish tizimidagi qo‘zg‘atish tok, kuchlanish, qo‘zg‘atish tizimining quvvati, hosil bo‘layotgan magnit maydon kuchi hamda rotorning tebranish koeffisenti, generatorning stator va rotorning harorati, podshibniklarning holati, stator, rotor qismlari chulg‘amlaridagi izolyatsiyaning eskirishi kabi elektr va mexanik parametrlarini inobatga olgan holda MATLAB/Simulink virtual dasturi yordamida modellashtirish amalga oshirilgan. Natijada, sinxron turbogeneratorlarning qo‘zg‘atish tizimidagi qo‘zg‘atish toki va kuchlanishini o‘zgarishi oqibatida generatorning stator chulg‘amlarida vujudga keladigan avariyalar, qo‘zg‘atish cho‘lg‘amlarini izolyatsiyasini shikastlanishini, quvvat o‘zgarishlari hamda elektr tarmog‘iga beriladigan kuchlanishning tushuvlarining sabablarini aniq grafiklar asosida amaliga oshirilib ko‘rsatilib berilgan.

Tayanch iboralar: *quvvat, stator, rotor, generator, qo‘zg‘atish tizimi, manba, o‘ta yuklama, tok, kuchlanish, modellashtirish, elektromagnit, statik, dinamik, shikastlanish, nosimmetriya, tadqiqot, chastota, ta’minot, avariya, vektor, faza uzilishi, koeffisiyent, MATLAB/Simulink.*

Сегодня роль синхронных турбогенераторов в бесперебойном электроснабжении различных потребителей нашей республики приобретает особое значение. Также обеспечение их бесперебойной работы является одной из актуальных задач сегодняшнего дня. Поэтому на основе систематического контроля электрических и механических параметров синхронного турбогенератора необходимо определять их техническое состояние путем проведения диагностических анализов. В данной статье показаны 2 различных способа работы систем возбуждения синхронных турбогенераторов, смоделированные с помощью виртуальной программы MATLAB/Simulink, и их диагностический анализ. На основе этих анализов будет возможен постоянный контроль электрических и механических характеристик системы возбуждения синхронного турбогенератора. Отличием данного метода от других существующих методов является то, что возбуждение в возбуждающей системе синхронных турбогенераторов может изменять такие электрические и механические параметры, как ток, напряжение, мощность возбуждающей системы, напряженность создаваемого магнитного поля и коэффициент вибрации ротора, температуру статора и ротора генератора, состояние подшипников, износ изоляции в обмотках статора, деталей ротора. виртуальная программа Matlab / Simulink с учетом моделирование осуществлялось с помощью. В результате аварии, возникающие на статорных подшипниках генератора в результате изменения тока и напряжения возбуждения синхронных турбогенераторов, повреждения изоляции подшипников возбуждения, изменения мощности и причины падения напряжения, подаваемого в электрическую сеть, показаны на основе точных графиков.

Ключевие слова: *мощность, статор, ротор, генератор, система возбуждения, источник, перегрузка по току, напряжение, моделирование, электромагнитное, статическое, динамическое, повреждение, симметрия, исследование, частота, питание, авария, вектор, фазовый переход, коэффициент, MATLAB/Simulink.*

Bugungi kunda Respublikamizda sanoat korxonalarida ishlab chiqarish hamda fan va texnologiyalar taraqqiyotining asosiy negizi hisoblangan katta quvvatli elektr is’temolchilarini uzliksiz elektr energiya bilan ta’minlab beruvchi sinxron turbogeneratorlarning ish rejimlarini optimal boshqarish usullarini takomillashtirish, xizmat davrlarini ta‘mirlashsiz uzaytirish, elektr stansiyadagi texnologik jarayonlarning kechikishini oldini olish, xususan elektr energiyani ishlab chiqarish jarayonida kelib chiqadigan avariyalarni erta aniqlab ularni bartaraf etish orqali sinxron turbogeneratorlarning ishonchliligini oshirish orqali elektr energiya iste’molchilari o’rtasida kelib chiqadigan energiya taqchilligini oldini olish bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar muhim ahamiyat kasb etadi.

Bizga ma’lumki bugungi kunda issiqlik hamda gidro elektr stansiyalarida elektr energiya ishlab chiqarishda sinxron generatorlari asosiy element hisoblanadi. Shu sababli ularning rotor qismida o‘rnatilgan qo‘zg‘atish chulg‘amlarida bugungi kunda izolyatsiyaning namligi yuqolishi, yemirilishi, elektrmexanik va elektmagnit maydon o‘zgarishlari, mexanik ta’sirlar hamda tashqi iqlim o‘zgarishlari sababli tasodifiy avariyalar ko‘p uchrab turmoqda [1].

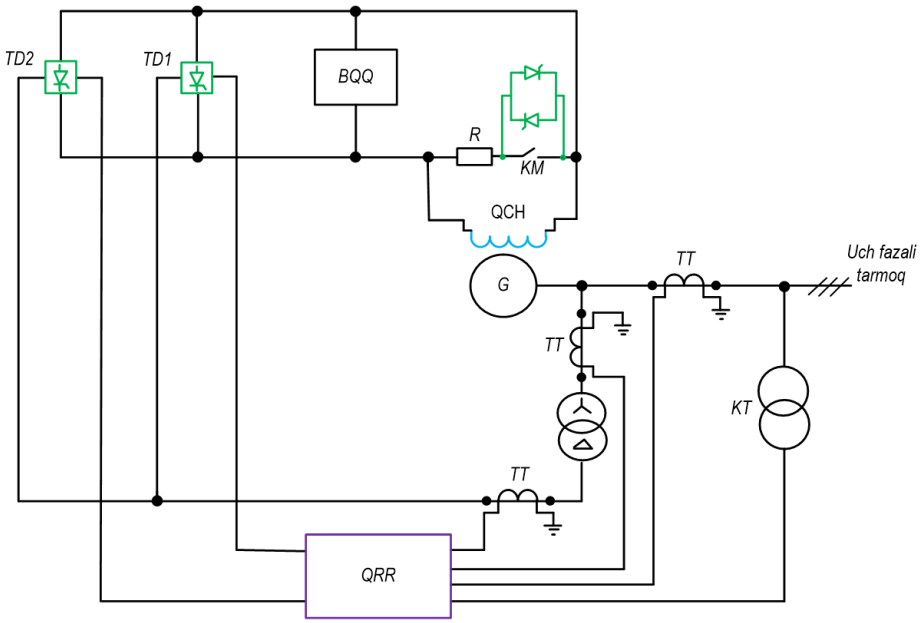
Sinxron turbogeneratorlarning qo‘zg‘atish tizimini quyidagi usullari mavjud:

– mustaqil o‘zgarmas tok mashinali qo‘zg‘atish tizimi;
– yuqori chatotali qo‘zg‘atish tizimi;
– mustaqil tiristorli qo‘zg‘atish tizimi;
– cho‘tkasiz qo‘zg‘atish tizimi;
– qo‘zg‘atish generatorini elekt mashinaga bog‘liqli qo‘zg‘atish tizimi;
– yarim o‘tkazgichli o‘z-o‘zini qo‘zg‘atish tizimi;

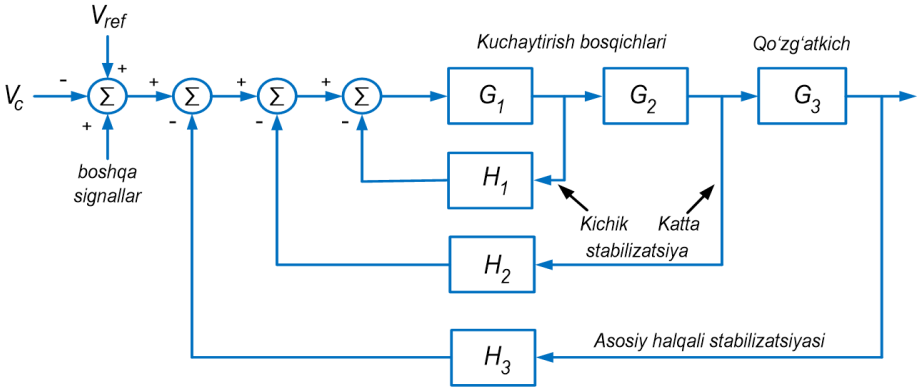
Sinxron turbogeneratorlarning qo'zg'atish tizimining asosiy konstruktiv elementrlari, avtomatik kuchlash rostlagichi (AKR), qo'zg'atkich (Q), quvvat tizimining stablizatori (QTS), o'lchash elementlari (O'E) hamda himoya vositalari. Qo'zg'atish tizimlari turli xil turlarga bo'linadi. Sinxron turbogeneratorlarning qo'zg'atish tizimi qo'zg'atishning quvvat manbaining turiga qarab uch guruhga bo'linadi. Bular, o'zgarmas tok mashinali (DC), o'zgaruvchan tokning o'zgartgichlari orqali ishlaydigan qo'zg'atish tizimi (AC) hamda statik qo'zg'atish tizimlari [2].

O'zgaruvchan tokning o'zgartgichlari orqali ishlaydig0an qo'zg'atish tizimi: Mustaqil qo'zg'atkichli tiristorli tizimlarda qo'zg'atuvchi asosiy sinxron generator bilan umumiy valda joylashgan yordamchi sinxron generatordir. Yordamchi generator ishlab chiqarayotgan o'zgaruvchan tokni to'g'rilash tiristorli o'zgartirgich yordamida amalga oshiriladi. Sinxron generatorning qo'zg'atish tokini tiristorlarning ochilish burchagining o'zgartirish orqali o'zgartiriladi (*1-rasm*). Ushbu qo'zg'atish tizimi eng tez ishlaydigan tizimlardan biri hisoblanadi.

Sinxron turbogeneratorlarni tiristorli qo'zg'atish tizimiga quyidagi elementlardan tashkil topgan: *G* – generator, *QCH* – qo'zg'atish chulg'ami, *QRR* – qo'zg'atkichni raqamli nazorat qilish, *BQQ* – boshlang'ich qo'zg'atish qurilmasi, *TD1*, *TD2* – tiristorli o'zgartirgich, *KM* – elektromagnit kontaktor, *KT* – kuchlanish transformatori, *TT* – transformator tok, *Tr* – kuch transformatoridan iborat [3, 4, 5]



1-rasm. O'z-o'zini tiristorli qo'zg'atish tizimini bir chiziqli sxemasi



2-rasm. Sinxron turbogenratorning qo'zg'atish tizimi modelining funksional tuzilishi

Tiristorli o'z-o'zini qo'zg'atish tizimi elektr mashinalarida, xususan, sinxron generatorlarda qo'llaniladigan zamonaviy boshqaruv usullaridan biridir. Ushbu tizimda tiristorlar yordamida generatorning qo'zg'atish toki boshqariladi, bu esa generatorning ish samaradorligini oshirishga xizmat qiladi. Tiristorli qo'zg'atish tizimlari generatorning qo'zg'atish chulg'amiga o'zgaruvchan tokni ta'minlash uchun tiristorli o'zgartkichlardan foydalanadi. Bu usul generatorning ish rejimlarini tez va aniq boshqarish imkonini beradi. Masalan, sinxron generatorlarda statik tiristorli qo'zg'atish tizimlari qo'llaniladi, bu esa generatorning barqarorligini oshiradi va samaradorligini yaxshilaydi. Tiristorli qo'zg'atish tizimi boshqa ananaviy qo'zg'atish tizimlariga qaraganda iqtisodiy jihaddan tannarxi juda qimmat hisoblanadi.

Qo'zg'atish tizimining dinamik ishlashini yaxshilash maqsadida miyorda saqlaydigan sxemalar foydalaniladi. O'zgarmas tokli (DC) va o'zgaruvchan tokli (AC) qo'zg'atish tizimlarida muhim vaqt o'zgarmaslari mavjud. Qayta aloqa kompensatsiyasi tizimi elementlar faoliyati natijasida yuzaga keladigan faza siljishini minimallashtirish uchun qo'llanilishi mumkin. Bu, masalan, sinxronlashgacha yoki yuklamani qayta tiklagandan so'ng, generatorning barqaror ishlashini ta'minlaydi.

Sinxron turbogeneratorlarning qo'zg'atish tizimlarining matematik modellari generatorning qo'zg'atish tokini boshqarish va himoya vositalarining parametrlarini baholash uchun qo'llaniladi. Bundan tashqari, butun tizimning dinamik barqarorligini saqlashga yordamchi vazifalarni bajaradi. Qo'zg'alish tizimi modelining umumiy tuzilishi (*2-rasm*). Ushbu modelning parametrlari va fizik parametrlar o'rtasidagi to'g'ridan-to'g'ri bog'liqlikni saqlab qolish afzalliklariga ega.

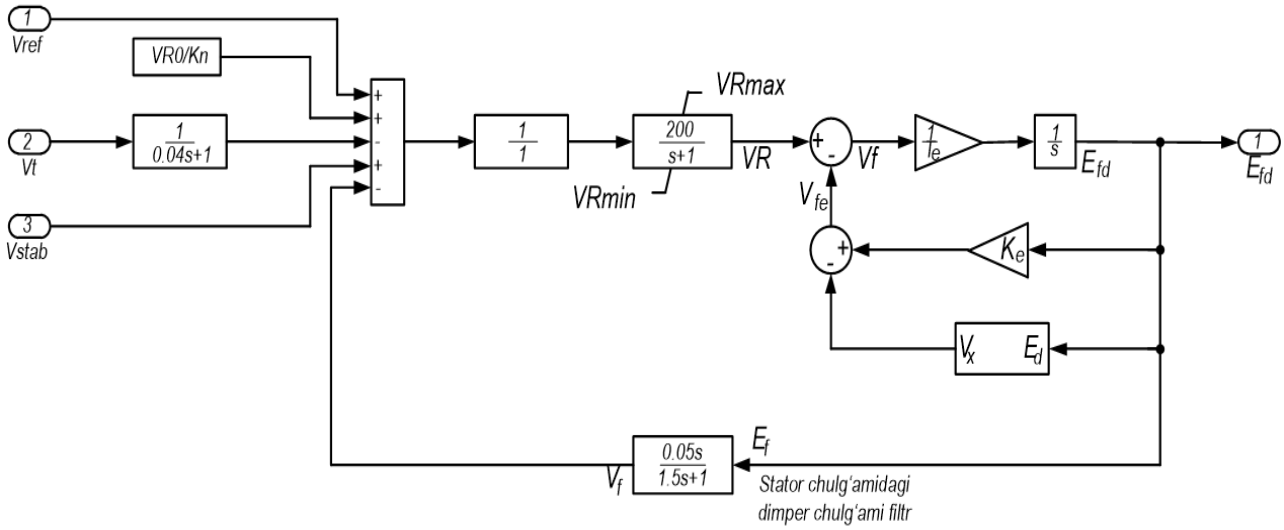
Soddalashtirilgan modelning parametrlari shundan iboratki, uning kuchaytirish va faza xususiyatlari 0 dan 3 Hz gacha bo'lgan chastota burchagi chegarasida batafsil (murakkab) modelning xususiyatlariga mos keladi. Tizim barqarorligiga ta'sir ko'rsatadigan barcha muhim noaniqliklar ham inobatga olingan. Biroq, soddalashtirilgan modelda parametrlar bilan haqiqiy tizim parametrlarining bevosita mosligi odatda yozib bormaydi [6].

Sinxron turbogeneratorlarning qo'zg'atish tizimidagi magnitli kuchaytirgich, aylanuvchi kuchaytirgich yoki elektron kuchaytirgich bo'lishi mumkin. Kuchaytirgich kuchaytirish koeffitsienti K_a va vaqt doimiysi T_a bilan ifodalanadi. Ushbu funksiyasi quyidagicha:

$$\frac{K_a}{T_a s} = \frac{V_R(s)}{V_e(s)} \qquad (1)$$

bu yerda, Kuchaytirgichning kuchaytirish koeffitsienti K_a ning odatiy qiymatlari 10 dan 400 gacha bo'lgan oraliqda bo'ladi. Kuchaytirgichning vaqt doimiysi T_a juda kichik bo'lib, 0,02 dan 0,1 soniyagacha bo'lgan oraliqda bo'ladi.

Sinxron turbogeneratorlarda hosil bo'ladigan elektromagnit yurituvchi kuchning (EMK) magnitlanish xarakteristikasi va chiqish klemmalar-



3-rasm. Sinxron turbogeneratorning o'zgarmas tok mashinali (DC1A) qo'zg'atish tizimini matematik ko'rinishi

idagi kuchlanishiga bog'liq bo'ladi. Bundan tashqari, u generator yuklamasiga ham ta'sir ko'rsatadi. Soddalashtirilgan modelda generatorning terminal kuchlanishi bilan maydon kuchlanishi o'rtasidagi bog'liqlikni ifodalovchi funksiyasi kuchaytirish koeffitsienti K_g va vaqt doimiysi T_g orqali ifodalanadi. Ushbu funksiyasi quyidagicha:

$$\frac{K_g}{T_g s} = \frac{V_T(s)}{V_F(s)} \qquad (2)$$

bu yerda K_g – datchikning kuchaytirish koeffitsienti;

T_g – vaqt doimiysini bildiradi.

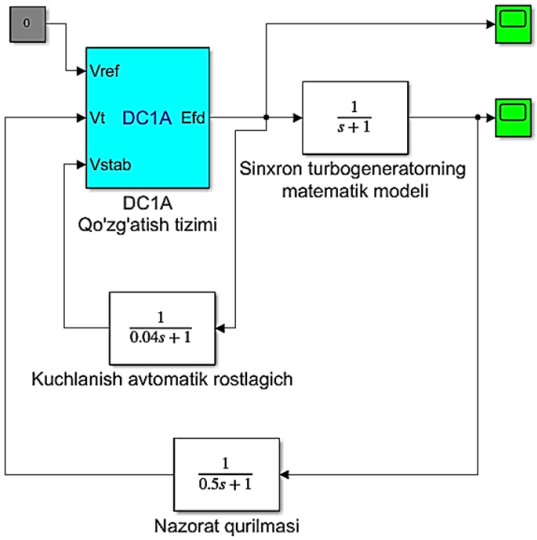
T_g ning qiymati juda kichik bo'lib, 0,01 dan 0,06 sekund oralig'ida bo'ladi. Yuqorida keltirilgan soddalashtirilgan model asosida tuzilgan avtomatik kuchlanishni boshqaruvchi qurilma (AVR) ning blok-sxemasi *3 -rasmda* ko'rsatilgan.

Yuqorida keltirilagan sinxron turbogeneratorning avtomatik kuchlanish rostlagich (AKR) tizimi quyidagi parametrlarga ega. DC1A qo'zg'atish modeliga, o'zgarmas tok mashinasini orqali hosil qilinadigan qo'zg'atish tokiga hamda kuchlanishni doimiy ravishda boshqaruv rostlagichlariga ega. Qo'zg'atkich alohida quvvat ta'minlanishi mumkin yoki o'z-o'zidan qo'zg'atish manbai bo'lishi mumkin, bu yerda o'z-o'zidan qo'zg'atish tizimi ko'p hollarda ishlatiladi. O'z-o'zidan qo'zg'atish tizimining qo'zg'atish koeffisenti (K_g), dastlabki kuchlanish rostlagichi (K_a) nolga teng deb qabul qilinadi (*4-rasm*) [7, 8].

Yuqorida keltirilgan rasmda ko'rinib turibdiki, sinxron generator kuchlanishini barqarorlashtirish va boshqarish uchun ishlab chiqilgan avtomatik tizimning ko'rinishi keltirilgan. Bunda, DC1A turidagi qo'zg'atish tizimi asosida qurilgan ushbu model elektr energiyasini ishonchli ishlab chiqarish va taqsimlashda muhim ahamiyatga ega [9, 10]. U elektr stansiyalarda avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarini o'rganish va loyihalash uchun keng qo'llash mumkin.

AC1A turidagi sinxron turbogeneratorlarning qo'zg'atish tizimi bo'lib, bunda generator tomonidan ishlab chiqariladigan elektr energiyasining kuchlanishidan foydalangan holda to'g'rilagichli qo'zg'atish tizimidir. Bu modelda ko'prikli to'g'rilagichlar yordamida yuqori tezkorda ishlash imkonini beruvchi qo'zg'atish tizimi sifatida ishlatiladi. Qo'zg'atish tizimining kuchlanishini barqarorlashtirish uchun odatda ketma-ket ulanadigan zahira tarmoq shaklida ta'minlanadi, bu esa o'tkinchi jarayonlarda kuchlanishni qiymatini oshishi yoki kamayishini oldini olish vazaifasini bajaradi (*5-rasm*) [11-13].

Yuqoridagi keltirilgan rasmda AC1A turidagi sinxron generatorning avtomatik boshqaruv tizimi modeli tasvirlangan bo'lib, u generator tomonidan ta'minlanadigan va boshqariluvchi to'g'rilagichga asoslangan



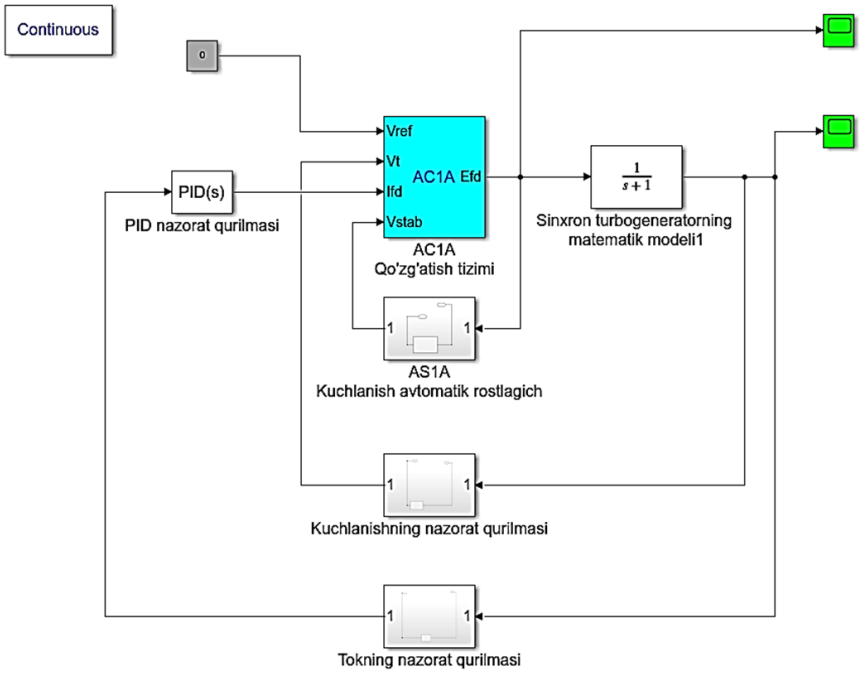
4-rasm. Sinxron turbogeneratorning o'zgarmas tok mashinali (DC1A) qo'zg'atish tizimini MATLAB/Simulink dasturida prinsipial ko'rinishi

qo'zg'atish tizimi hisoblanadi. Bu model elektr energetikasi sohasida kuchlanish va tokni avtomatik nazorat qilish tizimlarini tadqiq qilish va optimallashtirishda qo'llaniladi.

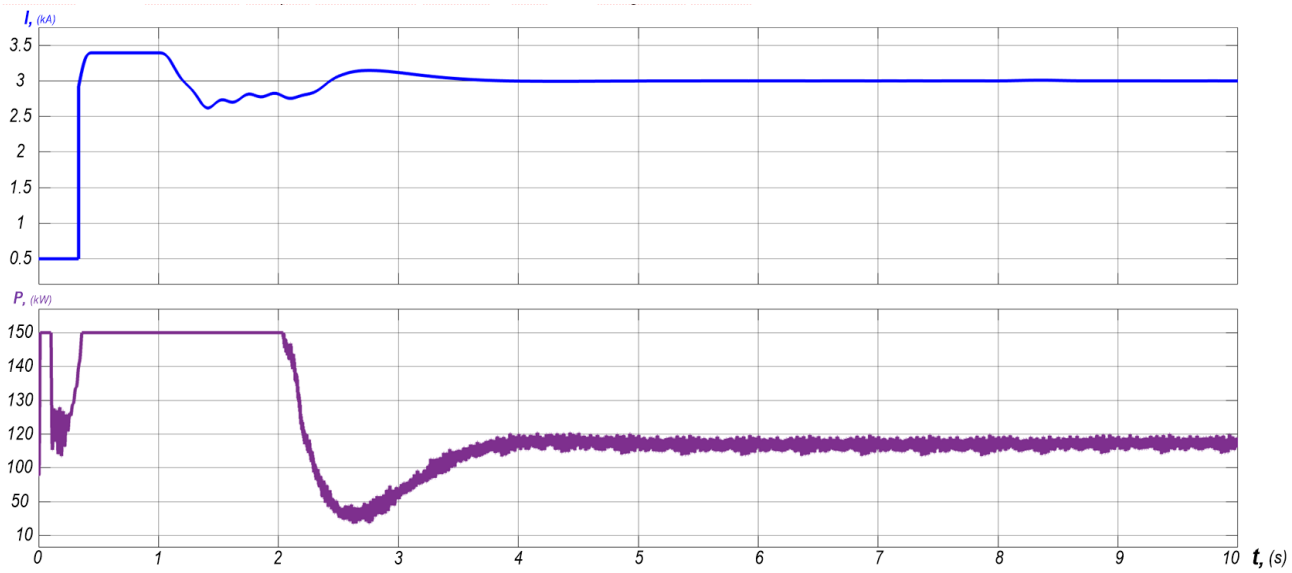
AC1A turidagi qo'zg'atish tizimining otsilograf natijalari *6-rasmda* ko'rsatilgan. DC1A turidagi qo'zg'atish tizimining qo'zg'atish tokining farqli ravishda, AC1A modelidan chiqish kuchlanishi dastlab 1 dan 4,25 voltgacha oshadi.

Yuqorida keltirilgan grafikda DC1A turidagi avtomatik qo'zg'atish tizimining ishga tushirilganidan so'ng qo'zg'atish toki qay tarzda o'zgarishi ko'rsatilgan. Grafikdan ko'rinib turibdiki, boshlang'ich paytda tokning qiymati nolga teng bo'lib, juda qisqa vaqt ichida keskin ortadi va 4 sekundda qo'zg'atish tokining nominal qiymatiga erishadi. Ushbu jarayon qo'zg'atish tizimining o'tkinchi jarayonidan barqaror holatga o'tishini ko'rsatadi. Bunday holatda avtomatik boshqaruv tizimining dinamik tavsiflarini, xususan, ularning o'z-o'zini muvozanatlash (avtostabilizatsiya) xususiyatlaridan biri hisoblanadi.

7-rasmda keltirilgan grafik AC1A (Alternating Current type 1A) turidagi avtomatik qo'zg'atish tizimining ishga tushirilgandagi o'tkinchi ja-



5-rasm. Sinxron turbogeneratorning o'zgaruvchan tok mashinali (AS1A) qo'zg'atish tizimini MATLAB/Simulink dasturida prinsipial ko'rinishi



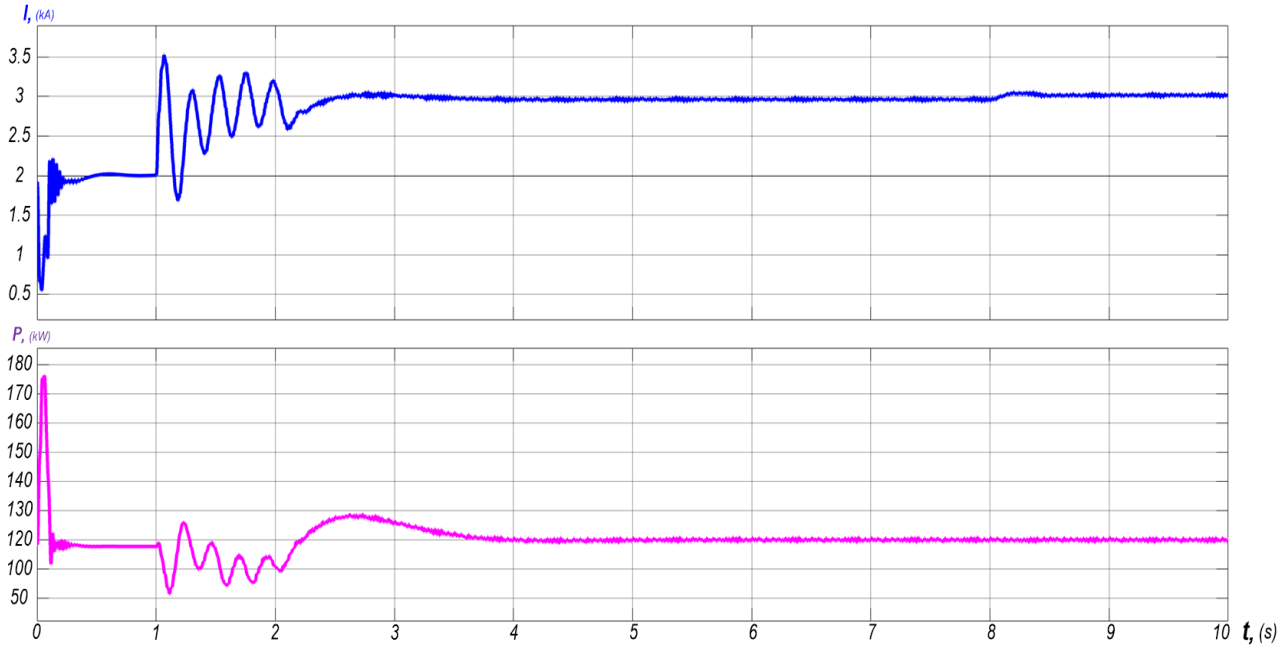
6-rasm. DC1A turidagi qo'zg'atish tizimining qo'zg'atish toki va aktiv quvvatning o'zgarish grafigi

rayoni davomida qo'zg'atish toki *(I_f)* qanday tarzda o'zgarishi ko'rsatilgan. Gorizontal o'q vaqtni (t, sekund), vertikal o'q esa qo'zg'atish tokini (If, amper) larni bildiradi. Grafikning shaklidan ko'rinadiki, tok boshlanishda nolga teng bo'lib, vaqt o'tishi bilan silliq ravishda ortadi va 2,5 sekunddan so'ng qo 'zg 'atish tokining nominal qiymatga erishadi. AC1A turidagi tizimlar odatda sinxron generatorlar uchun ishlatiladigan avtomatik qo'zg'atish tizimlari bo'lib, ular o'zgaruvchan tok manbai asosida ishlaydi. Ushbu grafik tizimning dinamik tavsiflari – ayniqsa, inertlik, o'tkinchi jarayonining vaqti va barqarorlik ko'rsatkichlarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega. Tokning barqarorlashuvi tizimning o'zgaruvchan yuklamalarga tez moslasha olish imkoniyatini yaratadi [14, 15, 16].

Xulosa qilib shuni takidlash mumkinki, sinxron turbogeneratorlarning qo'zg'atish tizimlarini virtual muhitda modellashtirish orqali ularning dinamik va statik xususiyatlarini tahlil qilish va ularning virtual muhiti yaratilgan. Ushbu yaratilgan modellar DC1A va AC1A turdagi avtomatik qo'zg'atish tizimlarining MATLAB/Simulink vitual muhitida yaratilgan modellariga asoslangan holda ularning vaqt bo'yicha o'zgaruvchi qo'zg'atish toklari (If) harakteristikasi o'rganildi. Ushbu grafik tahlillar yordamida har bir tizimning o'tkinchi jarayonlarnii, barqaror ishlash vaqtini, inertlik darajasi va dinamik barqarorlik holatlari aniqlandi.

DC1A turidagi qo'zg'atish tizimi tezroq barqaror holatda ishlashi va kuchli dinamik xususiyatlarga ega, AC1A tizimi esa silliq o'tkinchi jarayon va yuklamaga moslashuvchanligi bilan ajralib turadi. Bu esa ularning amaliy qo'llanilishida optimal tanlov qilish imkonini beradi.

Bundan tashqari, modellashtirish orqali sinxron generatorning ishlashida yuzaga kelishi mumkin bo'lgan izolyatsiya shikastlanishi, qo'zg'atish



7-rasm. AC1A turidagi qo'zg'atish tizimining qo'zg'atish toki va aktiv quvvatning o'zgarish grafigi

tizimi uzilishlari, kuchlanish pasayishlari va boshqa avariyaviy holatlar boshlanishini oldini olish va tahlil qilish imkonini beradi. Eng asosiysi, maskur ishlab chiqilgan virtual modellar yordamida real ob'ektdagi sinxron turbogeneratorning elektr va mexanik parametrlaridan foydalangan holda, xavfsiz, tezkor va aniq diagnostika olib borish imkoniyati vujudga keldi. Bu esa sinxron generatorlarning ekspluatatsiya qilishda ishonchliligini oshirish, texnik xizmat ko'rsatish intervallarini optimallashtirish hamda avariyalarni oldini olishda muhim ahamiyat kasb etadi.

Ushbu virtual modellashtirish usuli amaliyotda zamonaviy raqamli elektr energetika tizimlariga mos yuqori darajadagi monitoring va boshqaruv tizimlarini yaratishda asosiy vositalardan biri bo'lib xizmat qiladi.

Bibliografik ro'yxat:

1. Аллаев К. Р. Современная энергетика и перспективы ее развития // Под общей редакцией академика Салимова АУ. –Т.: «Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi», 2021. – 301 b.

2. Глебов И.Я. Диагностика турбогенераторов. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1989. – 119 с.

3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в энергетических системах. – М.: Высшая школа, 1978. – 415 с.

4. Галушко В.Н. Электрические машины. учеб. метод. пособие для самостоятельной проработки курса. М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2015. – 117 с.

5. Самородов Ю.Н. Турбогенераторы. Аварии и инциденты // Техническое пособие. – М.: «ЭЛЕКС-КМ», 2008. – 488 с.

6. Бабурин С.В., Жуковский В.Л., Коржев А.А., Кривенко А.В. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин // Горное оборудование и электромеханика. – № 9. – М.: «Новые технологии», 2009. – с. 34-38.

7. Ibrohimov U. Elektr mashinalari // Oliy o'quv yurtlari uchun darslik. 2-qayta nashr. – Toshkent: «O'qituvchi», 1988. – 372 b.

8. Tovbaev A., Boynazarov G., Togaev I. Improving the quality of electricity using the application of reactive power sources // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – T. 390. – C. 06032.

9.Turdibekov K.X., Sulliev A.X., Iskandarova O.S., Boboqulov J.S. Experimental and statistical methods for studying the modes of electric power systems under conditions of uncertainty // «E3S Web of Conferences». № 1. – Vol. 452, EDP Sciences, 2023, pp.1-6.

10. Narzullayev B.Sh. Asinxron motorlarning energo-mexanik ko'rsatkichlarini monitoring asosida texnik holatini diagnostika qilishi // Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi. – Toshkent, 2022. 52-61 b.

11. Qarshibayev A.I., Suyarov O.T., Narzullayev B.Sh., Rasulova B.I. Sanoat korxonalarining energiya iste'moli samaradorligini baholash // Energiya va resurslarni tejash muammolari. – Toshkent, 2019. 365-369 b.

12. Qarshibaev A.I., Narzullaev B.Sh. Diagnostics of the Technical Condition of Energy Devices based on the Monitoring of Phase Voltages and Currents // Journal of Pharmaceutical Negative Results. – 2022, pp. 2455-2460.

13. Narzullayev B.Sh., Tuykulov M.I. Analayzing of energy efficiency by installing solar panels on residential buildings and state institutions // Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences. № 9. – T.: Oriental Renaissance, 2023, pp. 54-60.

14. Qarshibayev A.I., Narzullayev B.Sh. Tog'-kon sanoati korxonalarida energiya iste'molini boshqarish va operativ rejalashtirish darajasini oshirish // Konmetallurgiya majmuasini innovatsion rivojlantirish istiqbollari mavzusidagi xalqaro ilmiy-texnik konferensiya materiallari. – Navoiy, 22-23 noyabr, 2018. 439-440 b.

15. Boboqulov J.S., Narzullayev B.Sh., Mingboyev U.T. Sinxron generator stator cho'lg'amida xosil bo'layotgan kuchlanishni hisoblash dasturi // O'zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi guvohnomasi. DGU 23696. – Toshkent, 2023.

16. Qarshibaev A.I., Narzullaev B.Sh., Murodov H.Sh. Models and methods of optimization of electricity consumption control in industrial enterprises // Физический журнал. – № 1. – Красноярск, Россия: «Прикладная физика». Том. 1679., 2020. – С. 1-6.

УДК 004.056:622.7 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.017

КИБЕРАТАКИ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Воробьев А.Е.,
профессор кафедры
«Гидравлика» Грозненского государственного
нефтяного технического университета, д.т.н.
(Российская Федерация)

Корчевский А.Н.,
декан
горного факультета
Донецкого национального технического
университета, к.т.н.

Maqolada mineralni qayta ishlash zavodlarining elektromexanik uskunalariga kiberhujumlarning xususiyatlari ochib berilgan. To'rtinchi sanoat inqilobi axborot texnologiyalarini ommaviy joriy etish, deyarli barcha texnologik jarayonlarni keng ko'lamda avtomatlashtirish va sun'iy intellektni sanoatda deyarli hamma joyda tarqatish asosida sanoat ishlab chiqarishiga printsipial jihatdan yangi yondashuvni o'z ichiga olganligi ko'rsatilgan. Sanoat ishlab chiqarishini nazorat qilish va boshqarishning yangi innovatsion usullariga o'tishi tasvirlangan. Sanoat tarmoqlari tomonidan kiberhujumlar, foydalaniladigan viruslarning asosiy turlari, yuzaga kelishi mumkin bo'lgan zaifliklarning taqsimlanishi, ularning ob'ektlari ko'rsatilgan, tog'-kon va konchilik va qayta ishlash korxonalarida sodir bo'lgan kiberhujumlar to'g'risidagi ma'lumotlar keltirilgan, Stuxnet virusining mineralni qayta ishlash zavodlarining elektromexanik tizimlariga ta'siri batafsil tavsiflangan.

***Kalit so'zlar**: kiberhujumlar, boyitish va qayta ishlash ishlab chiqarishlari, texnologiyalar, viruslar, ta'sir, elektro-mexanik uskuna, Sanoat 4.0, SCADA tizimlari, dasturlashtiriladigan mantiqiy boshqaruvchilar (PLC), Stuxnet virusi, sanoat xavfsizligi, kiberxavfsizlik, avtomatlashtirish, intellektual boshqaruv tizimlari.*

В статье раскрываются особенности кибератак на электромеханическое оборудование обогатительных фабрик. Показано, что четвертая промышленная революция предполагает принципиально новый подход к промышленному производству, основанный на массовом внедрении информационных технологий, масштабной автоматизации практически всех технологических процессов и практически повсеместном распространении искусственного интеллекта в промышленности. Описан переход промышленного производства на новые инновационные методы контроля и управления. Представлены кибератаки по отраслям промышленности, основные типы используемых вирусов, показано распределение возможных уязвимостей, их объектов, приведены данные о кибератаках, произошедших на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях, а также подробно описано воздействие вируса Stuxnet на электромеханические системы обогатительных фабрик.

***Ключевые слова**: кибератаки, обогатительные и перерабатывающие производства, технологии, вирусы, воздействие, электромеханическое оборудование, Индустрия 4.0, системы SCADA, программируемые логические контроллеры (ПЛК), вирус Stuxnet, промышленная безопасность, кибербезопасность, автоматизация, интеллектуальные системы управления.*

Введение. В настоящее время в мире происходит четвёртая индустриальная революция (Индустрия 4.0), концепция, выдвинутая Клаусом Швабом в 2016 г. (*рис. 1*), согласно которой практически все промышленные технологии в ближайшем будущее будут определяться широким внедрением киберфизических систем.

Это обстоятельство предполагает принципиально новый подход к промышленному производству, основанный на массовом внедрении информационных технологий, масштабной автоматизации практически всех технологических процессов и практически повсеместном распространении в промышленности искусственного интеллекта [1].

Так, конвергенция интернет-покрытия, использование многочисленных недорогих беспроводных датчиков, связи 5G и наличие возможности более мощной обработки данных, позволяют обеспечить оцифровку заводов и фабрик, чтобы существенно снизить имеющиеся производственные затраты, а также значительно увеличить производительность труда и повысить качество выпускаемой продукции.

Как правило, заводы и фабрики Industry 4.0 оснащены [2]:

– инновационным оборудование, оснащенным умными датчиками [3, 4];

– новым поколением автоматизированных промышленных роботов;

– дополненной и виртуальной реальностью, а также различными видеоинструментами (видеокамерами), которые взаимодействуют друг с другом и служит для обеспечения повышения производительности и эффективности промышленного производства.

В сочетании с программным обеспечением машинного обучения (ML) и аналитикой больших данных эти «умные» заводы и фабрики достигают довольно значительной эффективности на существующих технологических процессах, отслеживая и автоматически корректируя большинство действующих производственных циклов [2]. Они также помогают целенаправленно планировать необходимые изменения в производственных линиях, осуществляемые полностью в соответствии с прогнозируемыми «узкими» местами, графиками технического обслуживания, затратами и настройкой.

Основная часть. Современное производственное оборудование оснащено человеко-машинными интерфейсами (HMI), которые позволяют операторам и инженерам осуществлять в реальном режиме времени мониторинг и управление технологическим оборудованием.

Рис. 1. От Индустрии 1.0 к Индустрии 4.0

Рис. 2. Кибератаки в различные отрасли экономики

ICS представляет собой информационные системы, используемые для управления производственными процессами:

– *Системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA)* применяют для управления промышленными процессами и управления обработкой собранных данных.

– *Распределенные технологические системы (РСУ)* используются для управления наиболее сложными и крупномасштабными промышленными процессами в таких отраслях, как металлургия или фармацевтика.

– *Программируемые логические контроллеры (ПЛК)* автоматизируют процессы, происходящие на технологических линиях.

Однако, большинство промышленных систем управления (ICS), используемых в настоящее время на горно-обогатительных фабриках и заводах, были разработаны десятилетия назад и морально устарели (особенно, по критерию, кибербезопасности).

Переработка полезных ископаемых (обогащение) – довольно сложный промышленный процесс, включающий множество автономных и полуавтономных установок, применяющихся для обеспечения максимального выхода металлов из руд. Поэтому, для автоматизации технологических процессов в горно-обогатительных производствах уже довольно широко используются ПЛК [5], которые применяются в автоматизированных системах управления технологическим процессом (АСУТП).

Главная задача ПЛК – непрерывно считывать различные необходимые данные (например, температуру или давление) с датчиков, анализировать их по заданным алгоритмам и, в соответствии со сложившейся ситуацией, управлять исполнительными механизмами и устройствами (клапанами, задвижками, электродвигателями, сигнализациями и т.д.).

Задачи, для которых используются ПЛК на горно-обогатительных заводах и фабриках:

– *Управление конвейерами* – контроллер регулирует величину скорости движения ленты, синхронизирует работу автоматизированных устройств, и при появлении какой-либо неисправности останавливает технологический процесс.

– *Контроль величины давления в трубопроводах и другом оборудовании* – при отклонении от нормы ПЛК активируют задействованные насосы или при необходимости перекрывают заслонки, предотвращая аварию.

– *Аварийная остановка* – в случае разрыва целосности, утечки жидкостей или газов, а также перегрева ПЛК мгновенно отключает обогатительное оборудование, минимизируя возможные риски.

– *Сбор и анализ данных* – ПЛК собирают данные о производственных процессах, сенсорных измерениях, состоянии обогатительного оборудования и других параметрах, анализируют их, оптимизируют технологические процессы, выявляя возможные проблемы.

Современные критически важные инфраструктурные объекты широко используют компьютеры и различное программное обеспечение для мониторинга и управления промышленным оборудованием, которое поддерживает многочисленные технологические процессы.

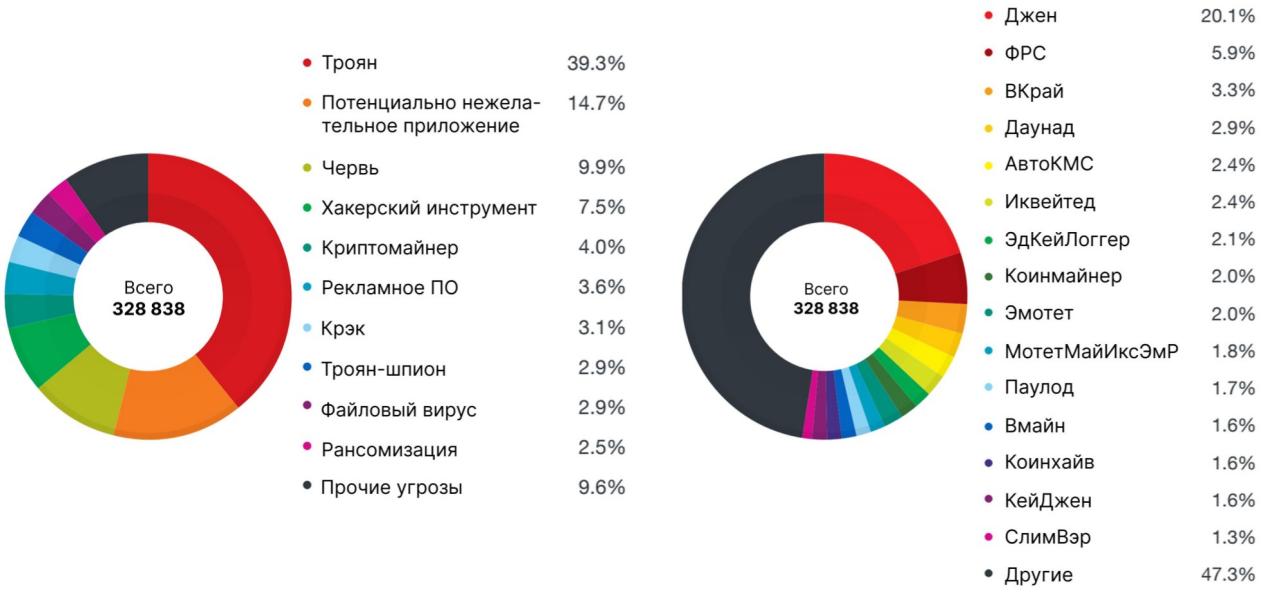


Рис. 3. Основные типы (а) и семейства (б) вредоносных программ в обрабатывающей промышленности

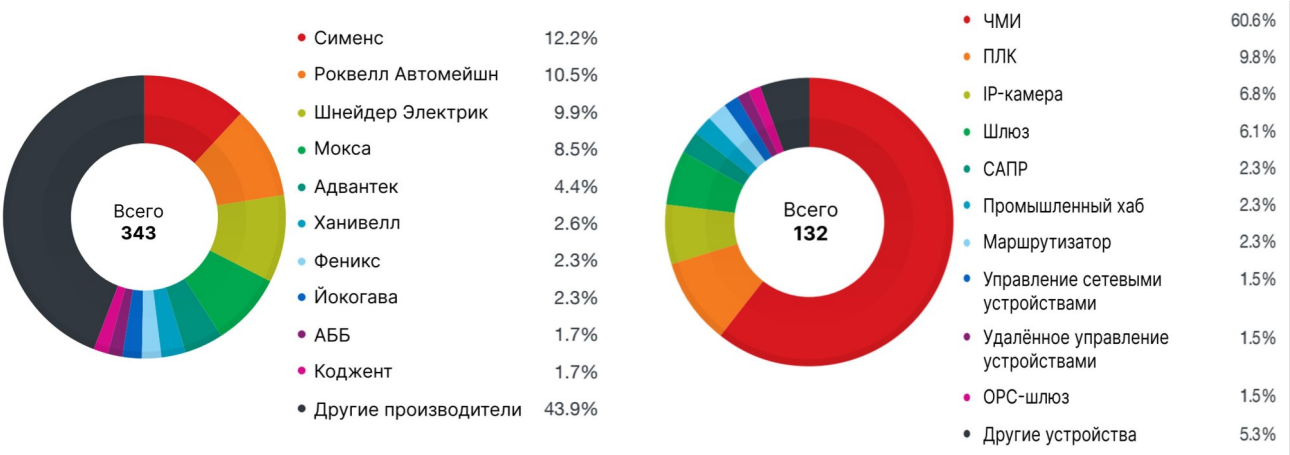


Рис. 4. Распределение уязвимостей, по поставщикам оборудования (слева) и по типам оборудования (справа) [8]

Уязвимости в подобных промышленных системах управления уже давно вызывают озабоченность как у специалистов по безопасности, так и у технологов [6]. В настоящее время, эксперты выявили ряд кибератак [7] в различные отрасли экономики (*рис. 2*).

Также было установлено количественное соотношение кибератак по типам и семействам вредоносных программ (*рис. 3*).

Если углубиться в проблему уязвимости промышленного оборудования отдельных производителей, то можно увидеть, что поставщики ICS Siemens, Rockwell Automation и Schneider Electric возглавляют этот список (*рис. 4*).

Кроме этого, на основании осуществленного анализа целей таких кибератак было установлено, что наибольшее количество уязвимостей затрагивает промышленные системы управления (АСУ ТП), контролирующие технологические процессы на различных предприятиях (*рис. 5*).

Также очевидно, что большинство вредоносных эксплойтов включают уязвимости HMI («человеко-машинный интерфейс»).

К уязвимым компонентам также относятся промышленные компьютеры и серверы (5 %), промышленные системы видеонаблюдения (4 %), различные устройства полевого уровня и реле защиты (*рис. 7*).

Известные кибератаки, которые произошли на горнодобывающих и горно-обогатительных компаниях, представлены в *табл. 1.*

Наибольшее внимание среди кибератак привлекают атаки на промышленное электромеханическое оборудование.

17 июня 2010 г. специалисты по безопасности из небольшой белорусской компании Virus Block Ada выявили вредоносное программное обеспечение Stuxnet, которое заражало USB-накопители [10]. В последствие, несколько крупных компаний по компьютерной безопасности тщательно изучили Stuxnet и пришли к выводу, что основной целью этого программного обеспечения был вызов скрытых сбоев в работе промышленного электромеханического оборудования, имеющего автоматизированные системы управления (ICS).

Было установлено, что Stuxnet – это весьма сложная компьютерная программа, разработанная для проникновения и установления контроля над удаленными системами в квазиавтономном режиме [11]. Те, на кого нацелился Stuxnet, были «изолированы», т.е. они не были подключены к общедоступному Интернету и для проникновения в них требовалось использование промежуточных устройств (таких, как USB-накопители), для получения доступа и установления контроля.

Рис. 5. Количество уязвимых продуктов в системах АСУ ТП, используемых в различных отраслях промышленности

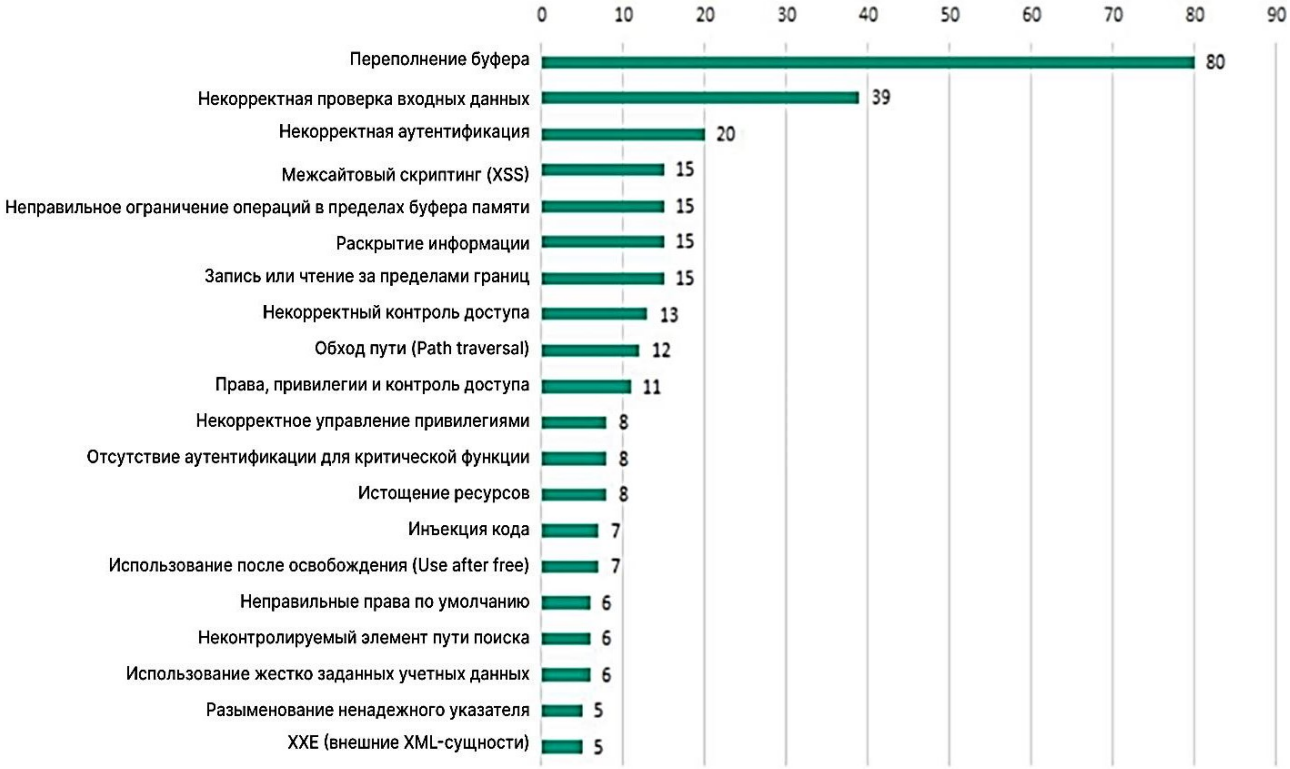


Рис. 6. Наиболее распространенные типы уязвимостей

Тип промышленного оборудования, которое заражает Stuxnet, известен как системы SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) [10]. Эти системы предназначены для сбора необходимых данных в реальном времени, управления и мониторинга критической инфраструктуры (включая электростанции, нефте- и газопроводы, нефтеперерабатывающие и обогатительные заводы, системы водоснабжения или другие технологические приложения), требующие компьютерного управления сложным электромеханическим оборудованием.

Рис. 7. Распределение уязвимости, выявленные компонентами АСУ ТП

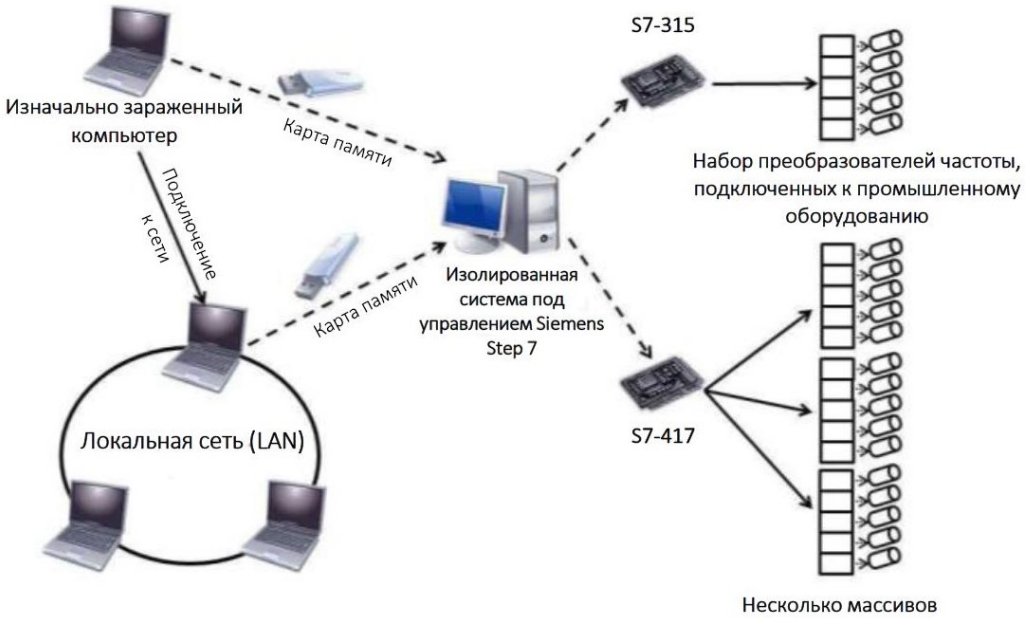


Рис. 8. Распространение червя Stuxnet

Для доступа к операционным системам Windows, на которых работают программы WinCC и PCS 7.5, червь Stuxnet по умолчанию использует нелегально полученные пароли Siemens [11]. Основными объектами кибератак являются программируемые логические контроллеры (ПЛК), которые управляют промышленными предприятиями.

Идеология такого червя состоит в том, что он не только поражает, но и перепрограммирует атакованные компьютерные цели. Чтобы запрограммировать ПЛК администратор подключает его к стандартному компьютеру Windows. Затем, когда ПЛК готов к использованию, его обычно отключают от компьютера. Так, например, если оператор намерен запустить центрифуги на более высокой скорости, то он подключает ПЛК к управляющему компьюеру, запускает программное обеспечение Windows, которое взаимодействует с ПЛК, и загружает новые служебные инструкции. Однако, вредоносная программа Stuxnet перехватывает их и вместо этого отправляет свои собственные инструкции.

Stuxnet был разработан для атаки на ПЛК, контролируемые Siemens [10]. Кроме того, он заражает только две модели ПЛК – Siemens S7-315 и S7-417 (рис. 8). S7-315 – это контроллер общего назначения, который может управлять различными фазами производственного процесса.

Вредоносное программное обеспечение этого червя также обеспечивает, что атаки на преобразователи частоты будут производится только на оборудование конкретных фирм-изготовителей. Так, первоначально Stuxnet выследил преобразователи частоты центрифуг, произведенные Fararo Paya в Иране и Vacon в Финляндии [11].

Как только червь Stuxnet определяет, что он заразил целевую конфигурацию преобразователей частоты, то он запускает кибератаку на PLC, которые управляют скоростью электродвигателей центрифуг, путем регулирования количеством подаваемой на них мощности [10].

Затем Stuxnet изменяет частоту электрического тока, питающего центрифуги, заставляя их переключаться между высокими и низки-

Таблица 1

Кибератаки, которые произошли на горнодобывающих и горно-обогатительных компаниях [9]

Дата	Жертва(ы)	Описание
Апрель 2010 г.	Группа компаний «Рио Тинто», BHP Billiton Ltd. и Fortescue Metals Group	Горнодобывающие гиганты Rio Tinto Group, BHP Billiton Ltd. и Fortescue Metal Group подверглись атакам хакеров из Азии. Эксперты полагают, что главной целью этих атак был коммерческий шпионаж
Февраль 2011 г.	BHP Billiton	Руководитель BHP Billiton Мариус Клопперс подтвердил, что главная причина заключается в стремлении к рыночному ценообразованию на основные товары и шпионаже компании, проводимом иностранными государствами и конкурентами, проникшем глубоко внутрь бизнеса BHP Billiton. Рыночное ценообразование на ключевые товары минимизирует влияние конфиденциальной информации, которую имеет одна из сторон
Апрель 2011 г.	Австралийский федеральный парламент	Хакеры взломали учетные записи электронной почты Федерального парламента Австралии, чтобы получить доступ к переписке по электронной почте между министрами и руководителями австралийских горнодобывающих компаний, работающих в Китае
Октябрь-ноябрь 2011 г.	Potash Corporation, юридические фирмы и Правительство Канады (Финансовый департамент и Казначейский совет)	Хакеры атаковали защищенные сети нескольких юридических фирм и в конечном итоге взломали компьютеры Финансового департамента правительства Канады и Казначейского совета. Они использовали фишинг, отправляя сотрудникам этих отделов письма, якобы отправленные группой аборигенов. Хакеры искали инсайдерскую информацию о корпоративном поглощении Potash Corporation of Saskatchewan
Февраль 2012 г.	Lynas Corporation	Сайт компании Lynas Corporation, занимающейся добычей редкоземельных металлов, был взломан хактивистами, которые протестовали против воздействия на окружающую среду деятельности Lynas в Малайзии
Июнь 2012 г.	TVI Resource Development (TVIRD)	Канадская горнодобывающая компания TVI Resource Development (TVIRD) стала жертвой кибератаки. Письма, якобы отправленные от имени TVIRD, содержали утверждения об убийствах и других преступных заговорах против мелких золотодобытчиков в Балабаге (Филиппины). Целью этой атаки было дискредитация TVIRD и заставить ее отказаться от соглашения о разделе продукции в Балабаге
Май 2013 г.	Anglo American	Анонимные хакеры, обвинив в "уничтожении природы и древних культур", атаковали Anglo American – крупнейшего мирового производителя платины. Хакеры взломали сайты этой компании и слили конфиденциальные данные (IP-адреса, учетные данные и информацию для инвесторов) в сеть
Октябрь 2013 г.	Бразильские шахты и Министерство энергетики Бразилии	Документы, обнародованные бывшим сотрудником АНБ Эдвардом Сноуденом, свидетельствуют о том, что западные разведслужбы отслеживали телефонные звонки и электронные письма, поступавшие в Министерство горнодобывающей промышленности и энергетики Бразилии и отправляемые оттуда
Май 2014 г.	Alcoa Inc. и Allegheny Technologies Inc.	Производитель алюминия Alcoa Inc. и производитель специальных металлов Allegheny Technologies Inc. стали жертвами хакерских атак из Азии. Компании не раскрыли всю информацию о взломах в SEC, поскольку утечки не были "существенными" для их бизнеса. Наиболее вероятной целью атак был коммерческий шпионаж
Февраль 2015 г.	Nautilus Minerals и Marine Assets Corporation (MAC)	Канадская компания Nautilus Minerals и компания по морским решениям с штаб-квартирой в Дубае Marine Assets Corporation (MAC) стали жертвами кибермошенничества, в результате котогого Nautilus выплатила депозит в размере 10 млн. долл., на неизвестный банковский счет
Апрель-май 2015 г.	Detour Gold Corp.	Канадская золотодобывающая компания Detour Gold Corp. была взломана группой, называющей себя "Ангелы Истины". Было похищено более 100 ГБ данных, из которых 18 ГБ компрометирующих документов были опубликованы на торрент-сайтах
Июнь 2015 г.	Codan	Австралийская компания Codan, занимающаяся технологиями геологоразведки и добычи полезных ископаемых, сообщила о резком падении продаж и цен на свои металлодетекторы после того, как хакеры похитили проекты и начали производить поддельные устройства
Ноябрь 2015 г.	International Mineral Resources (IMR)	Компания International Mineral Resources (IMR) подала иск, утверждая, что её конкурент EuroChem Volga-Kaliy нанял нью-йоркскую юридическую фирму Salisbury & Ryan для сбора информации о IMR в ходе сделки по покупке горнодобывающего бизнеса. Salisbury & Ryan предположительно наняли хакера для кибератаки на IMR
Февраль 2016 г.	Департамент промышленности, ресурсов и энергетики Нового Южного Уэльса	Хакеры атаковали Министерство промышленности и ресурсов Нового Южного Уэльса. Они безуспешно пытались получить доступ к конфиденциальной информации, связанной с разрешениями на добычу полезных ископаемых
Февраль 2016 г.	Горнодобывающие и энергетические компании Украины	Группы Black Energy и Sandworm были идентифицированы как вероятные организаторы атак на энергетическую инфраструктуру Украины в декабре 2015 года. Эти же группы предпринимали попытки кибератак против горнодобывающей компании и железнодорожного оператора в Украине
Апрель 2016 г.	Goldcorp	Канадская золотодобывающая компания Goldcorp стала жертвой масштабной утечки данных. Хакеры опубликовали 14,8 ГБ конфиденциальной информации на Pastebin, включая персональные данные сотрудников и финансовую отчетность

■	Корпоративный шпионаж	■	Манипуляция
■	Хактивизм	■	Физический ущерб

ми скоростями с интервалами, на которые эти машины не были рассчитаны [11]. На основе анализа этого вируса эксперты обнаружили, что он обуславливает работу приводов центрифуг в диапазоне от 807 до 1210 *Гц*. Затем этот вирус периодически изменяет эту настройку на значения в диапазоне от 2 до 1410 *Гц*, что приводит к быстрому разрушению центрифуг.

В результате такой кибератаки в Иране было разрушено свыше 1000 центрифуг IR-1 на заводе по производству урана в Натанзе [10]. И можно, с большой долей вероятности, предполагать, что работы по созданию новых вирусов, способных поражать и выводить из строя сложное промышленное электромеханическое оборудование в хакерской среде продолжаются.

Вывод. Для обеспечения устойчивости промышленных предприятий необходима комплексная и многоуровневая система киберобороны, включающая обновление устаревших систем управления, внедрение современных средств защиты, мониторинга и быстрого реагирования на угрозы.

Только опережающий подход к кибербезопасности позволит минимизировать потенциальные риски, защитить интеллектуальную собственность и обеспечить бесперебойную работу электромеханического оборудования в условиях стремительно развивающейся цифровой экономики.

Библиографический список:

1. Воробьев А.Е. Введение в искусственный интеллект // А.Е. Воробьев, К.А. Воробьев, К.К. Кушеков. – Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 132 с.

2. Arunkumar Azhagudurai. Industry 4.0 – the convergence of eight essential technologies & fostering a high-tech future with smart cities // URL: https://phemex.com/student-foundation/papers/industry4. P. 4. (дата обращения: 16.07.2025).

3. Воробьев А.Е. Информационные нанодатчики, применяемые в ТЭК // А.Е. Воробьев, Л. Чжан, К.А. Воробьев // Вестник Атырауского университета нефти и газа. – № 3 (47). – Казахстан, 2018. – С. 128-144.

4. Воробьев А.Е. Особенности конструкций нанодатчиков для нефтяной отрасли // А.Е. Воробьев, Л. Чжан, К.А. Воробьев // Горный вестник Узбекистана. – № 4 (79). – Навои, 2019. – С. 38-44.

5. Что такое ПЛК в АСУ ТП // URL: https://www.simbirsoft.com/blog/chto-takoe-plk-v-asu-tp. P. 3. (дата обращения: 16.07.2025).

6. John Rollins. The Stuxnet computer worm: harbinger of an emerging warfare capability // www.crs.gov. 2010. P. 2. (дата обращения: 16.07.2025).

7. Threat landscape for industrial automation systems H2 2018 // URL: chrome- extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ics-cert.kaspersky.com/media/KL_ICS_CERT_H2_2018_REPORT_EN.pdf. 2019. – 3 p. (дата обращения: 16.07.2025).

8. Matsukawa Bakuei, Ryan Flores, Vladimir Kropotov and Fyodor Yarochkin. Securing Smart Factories: threats to manufacturing environments in the era of Industry 4.0 // URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://documents.trendmicro.com/assets/white_papers/wp-threats-to-manufacturing-environments-in-the-era-of-industry-4.pdf. 2019. 41 p. (дата обращения: 16.07.2025).

9. Numaan Huq. Cyber threats to the mining industry // URL: https://documents.trendmicro.com/assets/wp/wp- cyber-threats-to-the-mining-industry.pdf. 2016. 52 p. (дата обращения: 16.07.2025).

10. Paulo Shakarian. Stuxnet: cyberwar revolution in military affairs // URL: https://www.researchgate.net/publication/230898148. 2011. – 5 p. (дата обращения: 16.07.2025).

11. James P. Farwell & Rafal Rohozinski. Stuxnet and the future of cyber war // [Электронный ресурс]. URL: Survival, 53:1. 2011, pp. 23-40. (дата обращения: 16.07.2025).

«GORNIY VESTNIK UZBEKISTANA», 2025. No. 3 (102) pp. 83-89

CYBER ATTACKS ON ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT OF PROCESSING ENTERPRISES

[1]***Vorobyev A.E.,*** *Professor of the Department of «Hydraulics», Doctor of Technical Sciences.*
[2]***Korchevskiy A.N.,*** *Dean of the Mining Faculty, Candidate of Technical Sciences.*

[1]***Grozny State Oil Technical University, Grozny, Chechen Republic, Russian Federation.***
[2]***Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic.***

The article reveals the features of cyber attacks on the electromechanical equipment of beneficiation plants. It is shown that the Fourth Industrial Revolution implies a fundamentally new approach to industrial production, based on the mass implementation of information technologies, large-scale automation of practically all technological processes, and the almost ubiquitous use of artificial intelligence in industry. The transition of industrial production to new innovative methods of control and management is described. Cyber attacks across industrial sectors are presented, the main types of viruses used are identified, the distribution of possible vulnerabilities and their targets is shown, data on cyber attacks that occurred at mining and beneficiation enterprises are provided, and the impact of the Stuxnet virus on the electromechanical systems of beneficiation plants is described in detail.

Keywords: *cyber attacks, beneficiation and processing industries, technologies, viruses, impact, electromechanical equipment, Industry 4.0, SCADA systems, programmable logic controllers (PLCs), Stuxnet virus, industrial safety, cybersecurity, automation, intelligent control systems.*

Bibliographic list:

1. Vorobyev A.E. Introduction to Artificial Intelligence // A.E. Vorobyev, K.A. Vorobyev, K.K. Kushekov. – Moscow – Vologda: Infra-Engineering, 2025. – 132 p.

2. Arunkumar Azhagudurai. Industry 4.0 – the convergence of eight essential technologies & fostering a high-tech future with smart cities // URL: https://phemex.com/student-foundation/papers/industry4. p. 4. (accessed: 16.07.2025).

3. Vorobyev A.E. Information Nanosenors Used in the Fuel and Energy Complex // A.E. Vorobyev, L. Zhang, K.A. Vorobyev // Bulletin of Atyrau University of Oil and Gas. – No. 3 (47). – Kazakhstan, 2018, pp. 128-144.

4. Vorobyev A.E. Features of Nanosenor Designs for the Oil Industry // A.E. Vorobyev, L. Zhang, K.A. Vorobyev // Gornyy vestnik Uzbekistana. – No. 4 (79). – Navoi, 2019, pp. 38-44.

5. What is a PLC in Automated Process Control Systems // URL: https://www.simbirsoft.com/blog/chto-takoe-plk-v-asu-tp. p. 3. (accessed: 16.07.2025).

6. John Rollins. The Stuxnet Computer Worm: Harbinger of an Emerging Warfare Capability // www.crs.gov. 2010. p. 2. (accessed: 16.07.2025).

7. Threat Landscape for Industrial Automation Systems H2 2018 // URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ics-cert.kaspersky.com/media/KL_ICS_CERT_H2_2018_REPORT_EN.pdf. 2019. – 3 p. (accessed: 16.07.2025).

8. Matsukawa Bakuei, Ryan Flores, Vladimir Kropotov and Fyodor Yarochkin. Securing Smart Factories: threats to manufacturing environments in the era of Industry 4.0 // URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://documents.trendmicro.com/assets/white_papers/wp-threats-to-manufacturing-environments-in-the-era-of-industry-4.pdf. 2019. – 41 p. (accessed: 16.07.2025).

9. Numaan Huq. Cyber Threats to the Mining Industry // URL: https://documents.trendmicro.com/assets/wp/wp-cyber-threats-to-the-mining-industry.pdf. 2016. – 52 p. (accessed: 16.07.2025).

10. Paulo Shakarian. Stuxnet: Cyberwar Revolution in Military Affairs // URL: https://www.researchgate.net/publication/230898148. 2011. – 5 p. (accessed: 16.07.2025).

11. James P. Farwell & Rafal Rohozinski. Stuxnet and the Future of Cyber War // [Electronic resource]. URL: Survival, 53:1. 2011, pp. 23-40. (accessed: 16.07.2025).

UO‘K 621.314 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.018

MURAKKAB BOG‘LANGAN KO‘P KONTURLI FERROREZONANS CHASTOTA O‘ZGARTIRGICHLAR TADQIQOTI

Shaymatov B.X.,
BDTU «Elektr va energetika muhandisligi» kafedrasi dotsenti, t.f.n.

Xolmurodov M.B.,
NDKTU «Elektr energetikasi» kafedrasi dotsenti, PhD

Maqolada ketma-ket bog‘langan ko‘p konturli ferrorezonans elektr zanjirlarida o‘z-o‘zidan tebranish jarayonlarini o‘rganilib, elektr uzatish liniyalari va melioratsiya tarmoqlarida telesignal tizimlari uchun quyigarmonik chastotalarning takomillashtirilgan manbalarini yaratilgan. Shu boisdan quyigarmonik chastotaning mavjud bo‘lish zonasini kengaytirish va elektromagnit rejimni optimallashtirish va signalizatsiya tizimini yuqori kuchlanishli tarmoq bilan moslashtirishning yangi tamoyillarini ishlab chiqilgan hamda vertikal drenaj nasoslarning meliorativ elektr tarmoqlarida foydalanishga moslashtirilgan tizimlari tahlil qilingan.

Kalit so‘zlar: *elektr zanjir, kontur, ferrorezonans, manba, yuqori kuchlanish, tarmoq, elektromagnit, nasos, meliorativ tarmoq, chastota o‘zgartirgich, nochiziq, induktivlik, chulg‘am, yarimo‘tkazgich, energiya manbai, zaryad, tebranish, tok, quvvat.*

В статье исследованы автоколебательные процессы в последовательно соединенных многоконтурных феррорезонансных электрических цепях и созданы усовершенствованные источники субгармонических частот для систем телесигнализации в линиях электропередач и мелиоративных сетях. Поэтому были разработаны новые принципы расширения диапазона субгармонических частот, оптимизации электромагнитного режима, адаптации системы сигнализации к высоковольтной сети, а также проанализированы вертикальные дренажные насосные установки, адаптированные для использования в мелиоративных электросетях.

Ключевые слова: *электрическая цепь, контур, феррорезонанс, источник, высокое напряжение, сеть, электромагнит, насос, рекультивационная сеть, преобразователь частоты, малость, индуктивность, катушка, полупроводник, источник энергии, заряд, колебание, ток, мощность.*

Hozirgi vaqtda ferrorezonans o‘zgartirgich asosida mintaqaviy tarqatish tarmoqlari, shu jumladan vertikal drenaj nasoslarning meliorativ tarmoqlari uchun TS (telesignalizatsiya) tizimi yaratilgan. Bunda texnik va iqtisodiy xususiyatlari yaxshilangan alternativ ferrorezonans o‘zgartirgichni ishlab chiqishning nazariy va amaliy masalalari ko‘rib chiqilgan.

Shu maqsatda ketma-ket bog‘langan ko‘p konturli ferrorezonans elektr zanjirlarida o‘z-o‘zidan tebranish jarayonlarini tadbiq qilish va ular asosida elektr uzatish liniyalari va melioratsiya tarmoqlarida TS tizimlari uchun quyigarmonik signallarning takomillashtirilgan manbalarini yaratishdan iborat. Ushbu maqsad quyidagi vazifalarni amalga oshirish orqali amalga oshiriladi:

1) chiqish chastotalari 16=3/2 *Gs* va 25 *Gs* chastotalarda quyigarmonik tebranishlar bilan chastota o‘zgartirgichining nazariy va eksperimental tadqiqotlarini o‘tkazish;

2) chastota o‘zgartirgich chiqishida uchinchi tartibli QGCh (quyi garmonik chastota) ning yumshoq qo‘zg‘alishiga sxemaning parametrlari va tuzilishini tanlash orqali erishish;

3) QGChda quyigarmonik chastotaning mavjud bo‘lish zonasini kengaytirish va elektromagnit rejimni optimallashtirish;

4) signalizatsiya tizimini yuqori kuchlanishli tarmoq bilan moslashtirishning yangi tamoyillarini ishlab chiqish;

5) vertikal drenaj nasoslarning meliorativ elektr tarmoqlarida foydalanishga moslashtirilgan TS tizimlarini ishlab chiqish.

Bundan tashqari tahlilning klassik usullari ham (masalan, asta-sekin o‘zgarib turadigan amplituda usuli) va ko‘p konturli ferrorezonans zanjirning elektron tahliliga asoslangan sifatli usullar ham qo‘llaniladi. QGChda quyigarmonik chastotalarning mavjud bo‘lish zonasini kengaytirish va elektromagnit rejimni optimallashtirish to‘g‘risidagi xulosalar turli chastotali o‘zgartirgichlar uchun asos bo‘lgan nochiziqli sxemani hisoblash uchun raqamli usullarga asoslangan. QGCh bo‘laklagichlarni meliorativ drenaj nasoslarda qo‘llanilishini ilmiy asoslashda asosiy qoidalar quyidagilarni tashkil etadi:

– chastotali o‘zgartirgich sifatida ishlatiladigan ko‘p konturli ferrorezonans sxemani tahlil qilish amalga oshirildi;

– ketma-ket ko‘p konturli ferrorezonans zanjirning uchinchi tartibli QGCh-ni yumshoq qo‘zg‘atish usuli topildi;

– xuddi shu elektr zanjir uchun ikkinchi va uchinchi tartibdagi QGCh mavjud bo‘lish chegaralari aniqlandi;

– QGCh 2 va 3-tartiblari chegaralarining kengayishini nazariy jihatdan ko‘rsatdi va amalga oshirildi;

– meliorativ elektr tarmoqlari uchun elektr uzatish liniyalarida TS tizimi ishlab chiqildi;

– kuchlanish transformatorlarisiz ishlashga imkon beradigan yuqori kuchlanishli elektr tarmoq signalini kiritishning yangi usulini ishlab chiqildi.

QGChlarning keng chegarada mavjudligi bilan taklif etilayotgan sxemada 2 va 3-tartibli QGChlarni olish imkoniyati ko‘rsatilgan, bu melioratsiya tarmoqlari uchun elektr uzatish liniyalarida TS tizimlarining axborot hajmini sezilarli tartibda kengaytiradi.

Ferrorezonans chastota o‘zgartirgichlari va fazalar soni asosida texnik xodimlarsiz podstansiyalarda elektr uzatish liniyalari uchun masofadan signalizatsiya tizimlarini ishlab chiqish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar natijasida zanjirli bog‘langan ko‘p konturli ferrorezonans zanjirlaridan foydalangan holda chastota bo‘laklagich yaratildi, bu signalizatsiya sifatida melioratsiya tarmoqlarida 6; 10; 35 *kV* elektr uzatish liniyalarining TS tizimida 16=3/2 *Gs* va 25 *Gs* nostandart chastotali generator sinovlaridan o‘tgan.

Bu esa 16=3/2 *Gs* va 25 *Gs* nostandart chastotali QGCh bo‘laklagich ishlab chiqarishning texnik talablariga javob beradi va melioratsiya tarmoqlari joylashgan bir qator drenaj-nasos stansiyalarning inshoatlarida joriy etildi.

Quyigarmonik tebranishlar deb ataladigan past chatotali tebranishlar kamida bitta nochiziqli elementini o‘z ichiga olgan elektromagnit tebranish konturlarida paydo bo‘ladi (nochiziqli induktivlik, nochiziqli sig‘im yoki ba’zi hollarda inersiyasiz nochiziqli qarshilik). Ferrorezonans zanjiridagi parametrlardan birining konturli o‘zgarishi natijasida chastotasi asosiy chastotaga teng yoki undan ko‘p bo‘lishi mumkin bo‘lgan parametrik yoki avtoparametrli tebranishlar (APT) paydo bo‘ladi.

Parametrlari nochiziqli bo‘lgan (kondensatorning sig‘imi, ferromagnit elementning induktivligi) ning tezlik bilan o‘zgarishida, zanjirning ekvivalent parametrlariga mos keladigan tebranish tizimining asosiy chastotasi teng bo‘lishi mumkin. Bunday holda “o‘zgartirish” chastotasining yarmi, tizimda quyigarmonik tebranishlar katta amplitudalarga ega bo‘ladi.

QGCh hosil bo‘ladigan barcha sxemalarni ikki guruhga ajratish imkoni mavjud:

– simmetrik Veber-amper (yoki kulon-volt) xususiyatlariga ega elementlarni o‘z ichiga olgan;

– nochiziqli elementlar nosimmetrik xususiyatga ega bo‘lgan sxemalar.

Birinchi guruhga rostlanmaydigan nochiziqli induktivlik (yoki sig‘im) va chiziqli elementi o‘z ichiga olgan elektr zanjirlari kiradi. Ushbu zanjirlarda QGCh ni qo‘zg‘atish uchun dastlabki impulsni berish kerak (*1-rasm*).

Ikkinchi guruh boshqariladigan nochiziqli induktivlik (yoki sig‘im) va chiziqli energiya iste’mol qiluvchi elementga ega bo‘lgan zanjirlardan iborat. Ushbu sxemalarda juft tartibli QGCH lar paydo bo‘lishi mumkin va qo‘zg‘aladigan tebranishlar amplitudasi asta-sekin noldan barqaror holatiga erishiladi. SHuni ta’kidlash kerakki, mavjud sxemalarni bunday taqsimlash shartli hisoblanadi va ular haqida batafsilroq ma’lumotlar V.M. Bladiko, V.N. Gorbaruk adabiyotlarida berilgan.

Elektroferromagnit to‘lqinli konturda (EFTK) QGCh qo‘zg‘alishi bir qator o‘ziga xos xususiyatlarga ega va zanjirning parametrlari nisbati va boshlang‘ich sharoitlariga bog‘liq. Ba’zi hollarda, masalan, kirish kuchlanishining silliq o‘zgarishi bilan, QGCh rejimi past chastotali o‘z-o‘zidan tebranadigan rejimga o‘tishi mumkin, bu esa nochiziq tebranishlarning ancha murakkab turi hisoblanadi.

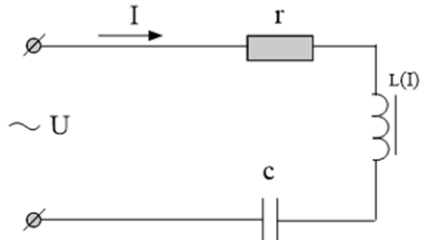
Har qanday tebranish tizimi potensial ravishda o‘z-o‘zidan tebranishi mumkin, chunki deyarli har doim ham paydo bo‘ladigan tasodifiy induksiyalar yoki zaryadlar (elektr uzatish liniyalari, atmosfera zaryadlari) bo‘lmagan taqdirda ham, har doim avtomatik parametrli tebranishlarni qo‘zg‘atishi mumkin.

Bunda to‘plangan zaryadlar yoki tasodifiy induksiyalar tufayli dastlabki boshlang‘ich sharoitlar mavjud. Bunday holda, qo‘zg‘aladigan tebranishlarning chastotasi parametr o‘zgarishi chastotasidan bir necha barobar kam [1, 3, 7, 8].

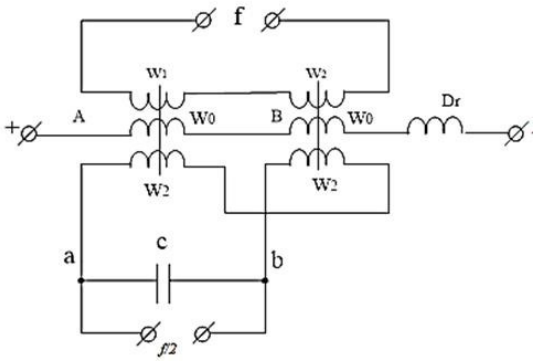
Ikkinchi guruhning sxemalarida QGCh qo‘zg‘alishi kondensatorning boshlang‘ich zaryad qiymatiga bog‘liq emas, garchi kirish kuchlanishining fazasi, amplitudasi va magnit oqimning kattaligi qo‘zg‘alish jarayoniga ta’sir qiladi.Ikkinchi tartibli QGCh uchun klassik sxemalardan biri bu muvozanatli zanjir deb ataladi (*2-rasm*), ikkita bir xil A va B transformatordan iborat bo‘lib, birlamchi chulg‘am W_1 ketma-ket va unga mos ravishda ketma-ket va teskari ulangan, ikkilamchi chulg‘am W2 ketma-ket va qarama-qarshi ulangan.

W_0 magnitlanish chulg‘ami bo‘lib, u tomonidan yaratilgan magnit oqim A transformatorining o‘zagidagi magnit oqimga qo‘shilib, ikkinchi transformatorning B o‘zagidagi magnit oqimdan ajratiladi. Avtoparametrik to‘lqinlarni QGCh sida qo‘zg‘atish uchun sig‘im S sxemasining “a-b” chiqishiga ulangan bo‘lishi kerak.

Transformatorlarning har biri uchun magnitlanish kuchlari quyidagiga teng bo‘ladi:



1-rasm. Rostlanmaydigan nochiziqli induktivlik va chiziqli elektr zanjirlari



2-rasm. Ikkinchi tartibli QGCh uchun muvozanatli zanjir

$$\overline{F_A} = \overline{I_0} \cdot W_0 + \overline{I_1} \cdot W_1$$

$$\overline{F_B} = \overline{I_0} \cdot W_0 - \overline{I_1} \cdot W_1$$

$$K = \frac{1}{2}; \frac{1}{3}; \frac{1}{4}; \frac{1}{5}; \ldots \frac{1}{n}.$$

Natijada, maxsus transformatorning Veber-amper tavsifi muvozanatsiz bo‘lib qoladi. Umuman aytganda, "a-b" chiqish qisqichlaridagi asosiy chastotaning umumiy kuchlanishi nolga teng, chunki bu chastotada W_2 chulg‘amlari bo‘ylab kuchlanish fazasi 180 elektr gradusga siljiydi. Biroq, ushbu “a-b” chiqish qisqichlarida avtoparametrli tebranishlarning qo‘zg‘alishi natijasida kuchlanish paydo bo‘lishi mumkin. Bu erda fazachastotali bunday bog‘lanishlar asosiy garmonikaning tarkibiy qismlari va QGCh o‘rtasida hosil bo‘ladi, ular zanjirning chiqish qismi va chastotani “ajratadi”. QGChlarning hosil bo‘lishi energiya manbaidan yuqori chastotali energiya kirish kuchlanishining bo‘laklangan chastotasi ko‘paytmasi bilan olinganligi sababli energiya oladi.

Buning sababi ferromagnit elementining chastotasi chiqish kuchlanishining chastotasidan ikki barobar ko‘p bo‘lgan manba ta’sirida vaqti-vaqti bilan o‘zgarishi bilan bog‘liq. Ushbu transformatorning birlamchi chulg‘ami faqat nochiziqli parametrning konturli o‘zgarishi uchun xizmat qiladi, bu elektr zanjiri energiya manbai chastotasining yarmiga o‘rnatilganda eng intensiv ravishda yuzaga keladi.

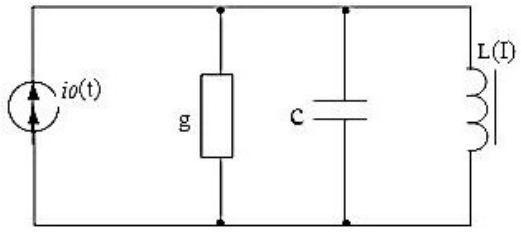
APT qo‘zg‘alishi paytida quyigarmonik chastotalarning hosil bo‘lishini oddiy ferromagnitik zanjirlar orqali o‘rganishga oid juda ko‘p ishlar amalga oshirilgan (*1-rasm, 2-rasm*) Bitta ferromagnitli element bilan L (i) [yoki nochiziqli sig‘im bilan C (u)]: [3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12].

Odatda, APT larning chastotasi quyidagicha:

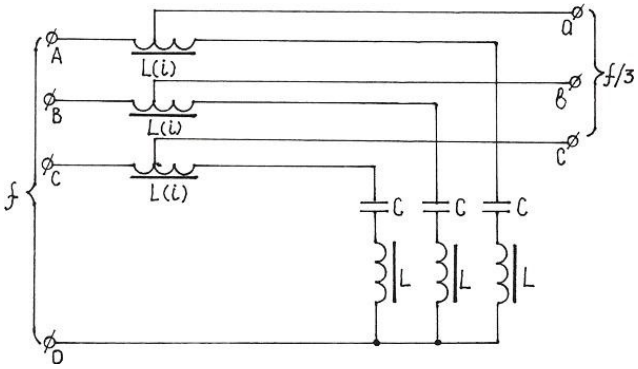
$$\Omega = K\omega$$

bu erda ω - energiya manbaining chastotasi.

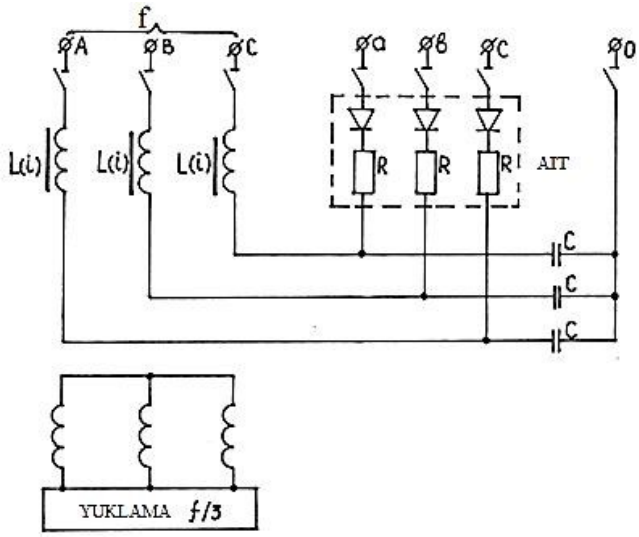
ferrorezonans zanjirda quyigarmonik rezonans, K = 2,3 va boshqalarda yarimgarmonik rezonans va agar K = 1 bo‘lsa, u holda Ω = ω va asosiy garmonikda rezonansga ega.



3-rasm. Ko'p konturli ferrorezonans zanjir



4-rasm. Chastota o'zgartirgich



5-rasm. Fazalar ketma-ketligini barqarorlashtirish uch fazali sxema

Ko'p konturli ferrorezonans zanjirlar ko'p holatlarda bir konturli zanjirlarga nisbatan faza holatining barqarorligi va barqaror chastotalarda APT ni ta'minlash qobiliyatiga ega bo'lganlar bilan taqqoslanadi.

Chastotani va fazalar sonini o'zgartirish uchun maxsus sxemalarni yaratish nuqtai nazaridan ular juda katta nazariy va amaliy qiziqish uyg'otadi, chunki ular ferrorezonans o'zgartirgichlarning tiristorli o'zgartirgichlaridan yaxshi ajratib turadigan xususiyatlarini amalga oshirishga imkon beradi, ya'ni tuzilishining soddaligi va ishlashdagi ishonchlilik, chiqish kuchlanishining egri chiziqlari sezilarli tartibda yaxshilanishi, chastotani va fazalar sonini bir vaqtning o'zida o'zgartirish imkoniyati mavjudligi.

Ko'p konturli ferrorezonans zanjirlar hal qila oladigan yana bir muammo - bu fazalar sonini ko'p fazali yuklamani bir fazali manbadan nostandart chastotali tok bilan ta'minlashga aylantirishdir. Shu bilan birga, ferrorezonans o'zgartirgichlarda berilgan faza taqsimoti yuklamaning parametrlariga bog'liq emas.

Kerakli chastotaning ko'p fazali kuchlanish manbasini olish muammosi yoki ketma-ket [5] yoki parallel [8] ulangan bir fazali ferrorezonans zanjirlarni guruhlash yoki ko'p fazali transformatorlar yordamida hal qilinadi [9].

Klassik adabiyotdan bizga ma'lum bo'lgan chiqishi uch fazali o'zgartirgichlarni ikki turga bo'lish mumkin. Birinchi tur - bu ham chastotali o'zgartirgichni, ham fazalar sonini amalga oshiradigan ferromagnit chastotali o'zgartirgichlar (FChO') [1, 2, 3, 4]. Ikkinchi turi chiqishda fazalar sonini o'zgartirmasdan faqat chastotali o'zgartirishni amalga oshiradigan FChO'lar uchun ishlatiladi [6, 7].

Ikkala holatda ham chastotani o'zgartirish prinsipi quyigarmonik chastotada avtomatik parametrli tebranishlarni qo'zg'atishga asoslangan. *4* va *5-rasmlarda* ko'rsatilgan elektr zanjirlarida faqat chastota o'zgartirgich holati aks ettirilgan.

Bu erda manbadan uch faza iste'mol qilgan uchta ketma-ket bog'langan ferrorezonans kontur bilan ishlaydigan ko'p fazali kirish va chiqishga ega bo'lgan zanjir ko'rsatilgan.

Bunday ko'p konturli ferrorezonans zanjirlarning xususiyati bir fazaning ikkinchisiga ta'sirini o'zaro magnitlanishi natijada magnit o'zaklarning har birida magnit maydonning tarkibiy qismi paydo bo'ladi. Ushbu tashkil etuvchilar va boshqa garmonikalar tufayli fazadagi kuchlanish formasi va amplituda buzilgan bo'ladi. Ularning amplitudasi nosimmetrik bo'lib, chiziqli kuchlanishlar bu buzilishlarga kamroq ta'sir qiladi

Ushbu sxema APT paydo bo'lganda va fazalar ketma-ketligini barqarorlashtirganda qo'llaniladigan kuchlanishning dastlabki fazasini ma'lum bir qiymatini ta'minlash uchun avtomatik ishga tushirish (AIT) moslamasi mavjudligini nazarda tutadi.

5-rasmdagi fazalar ketma-ketligini barqarorlashtirish uch fazali transformatorni ferromagnit element sifatida ishlatish bilan ta'minlanadi, ammo shu bilan birga o'zaro magnitlanish kuchayadi va chiqish kuchlanishning formasi va amplitudasi ham buzilishiga bog'liqlik bo'ladi.

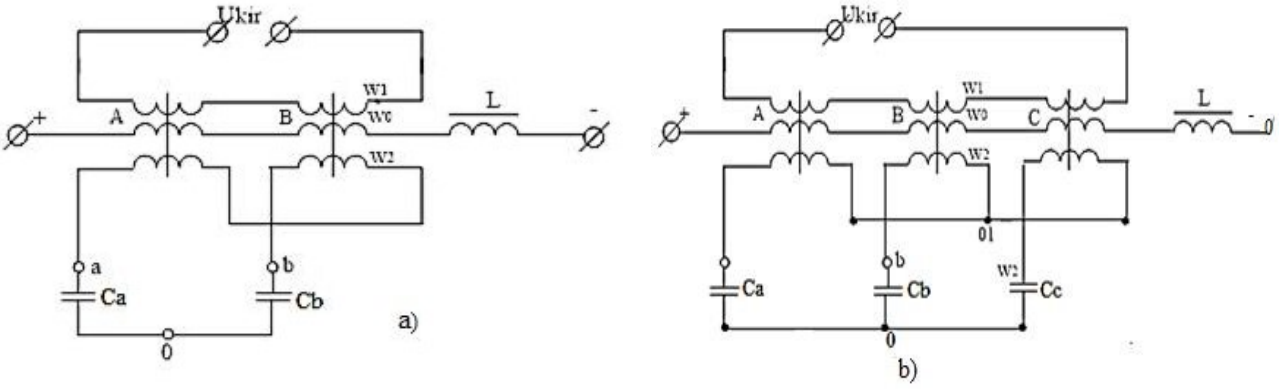
Bundan tashqari, zaryadlash jarayonida chiziqli kondensatorlarni qo'shish uchun avtomatik ishga tushirish moslamalari mavjud deb taxmin qilinadi. Shunday qilib, yuqorida ko'rib chiqilgan ishga tushirish moslama qurilmalarda chastotani o'zgartirishni amalga oshiradigan holatda kamchilik mavjud bo'lib, u chiqish kuchlanishi amplitudasining nosimmetriyasidan, shuningdek magnitlanish tizimidan iborat.

Zanjirning ikkinchi turi an'anaga aylangan va "muvozanatli" deb nomlangan ferrorezonans zanjir kiradi. *3-rasmdagi* sxema chastotani ikki marta bo'luvchi sifatida ishlatiladigan ikkita bir xil A va V transformatorlardan va chiziqli kondensator S dan iborat.

Agar ushbu sxemaning ikkilamchi chulg'amini shartli ravishda ikki konturli zanjir deb qaralsa, chiziqli sig'im A va B transformatorlarining nochiziqli induktivlari, bir xil ko'plikdagi fazalar sonini bir vaqtning o'zida ko'paytirish bilan birga ikkita ferrorezonans zanjir bilan birgalikda chastota bo'linish hosil bo'ladi (*6, a-rasm*), ya'ni ushbu sxemalarda ikki marta chastotani bo'linishini kuzatamiz va QGCh ning $U_{a\ 0}$ va U_{b0} kuchlanishlari bir-biriga nisbatan 1800 gradus burchakga siljiydi.

Ko'p konturli elektroferromagnit tebranishlar konturini yanada kengroq o'rganish uchun ulardagi APT ni ikkinchi va uchinchi tartibli QGCh chastotasida qo'zg'atish nuqtai nazaridan, *6, b-rasmda* ko'rsatilgan ikkita parallel ulangan ferrorezonans tebranishlar konturiga yana bitta magnitlanuvchi kontur ulangan holda tebranish zanjirini keltiramiz.

Uch fazali zanjirda ma'lum chastotali, amplituda va fazalar munosabatlarining APT da qo'zg'alishi ferrorezonans zanjirlarining har birining fazaviy holati bilan belgilanadi. APTi qo'zg'atish uchun uchta parallel ferrorezonans zanjirning birida hosil qilib, qolgan ikkita konturda

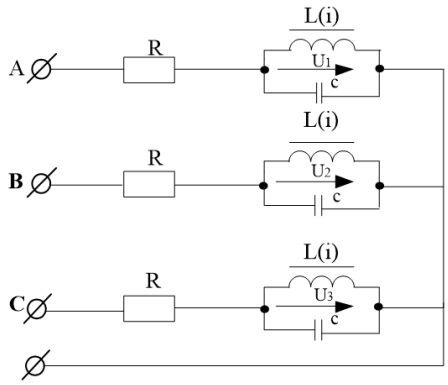


6-rasm. Ikkita parallel ulangan ferrorezonans tebranishlar konturiga yana bitta magnitlanuvchi kontur ulangan holda tebranish zanjiri: *a) Ikkita ferrorezonans zanjir bilan chastota bo'linish sxemasi; b) Ikkita parallel ulangan ferrorezonans sxemasi*

tebranishlarga moslashtiriladi (*7-rasm*). Bunday holda, Uav, Uvs, Uca kirish kuchlanishlari va ferrorezonans zanjirdagi u_1, u_2 va u_3 kuchlanishlar o'rtasidagi muvozanat tenglamalari ham noaniq bo'ladi.

Ko'p fazali konturlarda qo'zg'alish va barqarorlikni APT shartlarini o'rganish shuni ko'rsatdiki, ba'zi xususiyatlar, xususan, APT va elektr ta'minoti o'rtasidagi fazaviy munosabatlar bilan bog'liq bo'lgan xususiyatlar texnologiyaning turli sohalarida qo'llanilishi mumkin bo'lgan fazali barqaror xususiyatli qurilmalarni yaratishga imkon beradi. Ko'p fazali tizimlarning muhim xususiyatlaridan biri shundaki, quyigarmonik tebranishlarning tartibini ko'payishi bilan fazaviy holatlar soni ko'payadi.

Shunday qilib, QGT lar chastotasida faza va chiziqli kuchlanishlarning qiymatlarini qoniqtiradigan bir nechta fazaviy holatlar mavjud, ya'ni ferrorezonans zanjirlarning har biridagi QGT larning fazaviy holatlari biri yoki boshqasida paydo bo'lgan tebranishlarning amplitudasini aniqlaydi. Shunga binoan fazadagi siljishlar noaniq bo'lgani uchun, fazalardagi QGCh amplituda qiymatlari ham noaniq bo'ladi.



7-rasm. Uchta parallel ferrorezonans zanjir

Bibliografik ro'yxat:

1. Артемьев А.А. Схемы пуска феррорезонансных преобразователей частоты // ИВУЗ, Энергетика. 2007. – № 1, – 328 с.

2. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. – М.: изд. Связь, – 2017. – 385 с.

3. Атабеков Г.И., Тимофеев А.В., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники. ч.2, Энергия, 2019. – 460 с.

4. Бессонов А.А. Нелинейные электрические цепи. М.: Высшая школа, 2019. – 429 с.

5. Каримов А.С., Турдыев М.Т. Особенности возбуждения субгармонических колебаний в многоконтурных феррорезонансных цепях переменного тока. Электричество. – №11. 1979. – 20-25 с.

6. Каримов А.С., Турдыев М.Т., Бурханходжаев А.М., Худайкулов З.Р. Однофазно-трехфазный ферромагнитный преобразователь частоты и числа фаз. УзНИИНТИ. 1982. – 327 с.

7. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей, нелинейные цепи. – М.: Высшая школа, 1986. – 516 с.

8.Турдыев М.Т., Камалов У.У., Шайматов Б.Х. Схемный анализ многоконтурных феррорезонансных цепей. Сб. научных трудов Актуальные вопросы в области механики, совершенствование и раз-витие технологических систем. Ташкент, 1991. – С. 56-64.

9. Shaymatov B., Rahmatov D., Kholmurodov M., Mukhtorov A., Rakhmatova M. Probe of process of multiple-loop chains of parallel and consecutive joints. E3s Web of Conferences 216, 01142 (2020) RSES 2020 https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601142.

10. Shaymatov B., Rakhmatova M., Komilov S., Qurbonova D. The application of three-contour Ferreaseezones chain-based frequency transformers. Conmechydro 2021 (International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering Conmechydro–2021): http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85108219769&partner_id=mn8toars.

11. Shaymatov B., Khozhiev K.B., Kholmurodov M.B. Formation of low-frequency currents in ferromagnetic oscillatory circuit In Volume 3, Issue 02 of International Bulletin of Engineering and Technology ISSN: 2770-9124 impact factor:8.1. 25.02.2023 https://doi.org/10.5281/zenodo.7676594.

12. Шайматов Б., Холмуродов М.Б., Хожиев Қ.Б., Абдувалиев Б.З., Мизамов Ю.С. Способы ввода сигналав высоковольтную сеть и согласование параметров преобразователя Eurasian journal of academic research Innovative Academy Research Support Center UIF =SJIF=29.03.2023 https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7780178.

УДК 681.586

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.020

KONCHILIK SANOATIDA QO‘LLANILADIGAN KONUSLI MAYDALAGICH ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH USULLARI

Mavlonov J.A.,
NDKTU «Energetikasi» kafedrasi mudiri, t.f.n., dotsent

Olimov J.S.,
NDKTU «Elektr energetikasi» kafedrasi assistenti

Tog‘-kon va qurilish sanoatida mineral xom ashyoni maydalash va yanchish jarayonlari keng tarqalgan, hamda elektr energiyani ko‘p talab qiladigan texnologik jarayonlar bo‘lib, tog‘-kon sanoati korxonalarida iste’mol qiladigan elektr energiyasining 20% ga yaqinini tashkil qiladi. Hozirgi vaqtda maydalash jarayonlari eng ko‘p energiya talab qiladigan operatsiyalardan biri bo‘lib, qayta ishlash korxonalarining umumiy energiya resurslarining 50-60% dan ko‘prog‘ini tashkil qiladi. Shu sababli, ruda tayyorlash jarayoni va rivojlanish tendentsiyasida energiya samaradorligini oshirish uchun uskunalar tanlash, katta birlik quvvatga ega yuqori unumli uskunalardan foydalanish, maydalash jarayonlarini kuchaytirish va texnik echimlarni ishlab chiqish dolzarbdir. Shu sababli, konusli maydalagich asosiy parametrlari (eksentrik og‘ish burchagi, konus aylanish tezligi va yuklama) dan foydalangan holda experimental tajribalar o‘tgazildi va optimal ish jarayoni va energiya samaradorligiga erishish asosiy ustuvor vazifalari belgilandi.

Kalit so‘zlar: *jag‘li, bolg‘ali va konusli maydalagichlar; elektr yuritmalar; elektr dvigatelining quvvati; ezuvchi konusning taglik diametri; ochiq tomonda qabul qiluvchi teshikning kengligi; ishchi quvvat; gidrometalurgiya; faza rotorli asinxron motor; rudaning qattiqligi; elektr yuritma; stator tok; aylanish tezligi; reaktiv quvvat; yuklama darajasi.*

Дробление и измельчение минерального сырья широко распространены в горнодобывающей и строительной промышленности и являются технологическими процессами, требующими больших затрат электроэнергии, на долю которых приходится около 20% потребляемой горнодобывающими предприятиями электроэнергии. В настоящее время процессы дробления являются одними из самых энергоемких операций, на их долю приходится более 50–60 % общих энергоресурсов перерабатывающих предприятий. Поэтому актуальным является выбор оборудования для повышения энергоэффективности процесса подготовки и развития руды, применение высокопроизводительного оборудования с большой единичной мощностью, усиление процессов дробления, разработка технических решений. Таким образом, были проведены экспериментальные эксперименты с использованием основных параметров конусной дробилки (угол отклонения эксцентрика, скорость вращения конуса, нагрузка) и определены основные приоритеты для достижения оптимальной работы и энергоэффективности.

Ключевые слова: *щековые, молотковые и конусные дробилки; электроприводы; мощность электродвигателя; диаметр днища дробящего конуса; ширина приемного отверстия с открытой стороны; рабочая мощность; гидрометаллургия; асинхронный двигатель с фазным ротором; крепость руды; электропривод; ток статора; частота вращения; реактивная мощность; уровень нагрузки.*

Kirish. Tog‘-kon va qurilish sanoatida mineral xom ashyoni maydalash jarayonlari uchun jag‘li, bolg‘ali va konusli maydalagichlar keng qo‘llaniladi. Qattiq materiallarni maydalash uchun eng ko‘p ishlatiladigan konusli maydalagichlar bo‘lib, unda material bo‘laklari statsionar konus shaklidagi idish ichida aylanma eksentrik harakat asosida aylanadigan konus tomonidan maydalanadi.

Aylanish jarayonida, harakatlanuvchi konusning boshi, bir tomondan, tanaga yaqinlashib, xom ashyo bo‘laklarini parchalaydi va ikkinchi tomondan, mahsulotning to‘kilishini ta'minlash uchun undan uzoqlashadi. Konusli maydalagichlar (*1-rasm*) yirik (KKD), o‘rta (KSD) va kichik (KMD) hajimdagi xomashyo ishlab chiqarish mo‘ljallangan turlari mavjud [1].

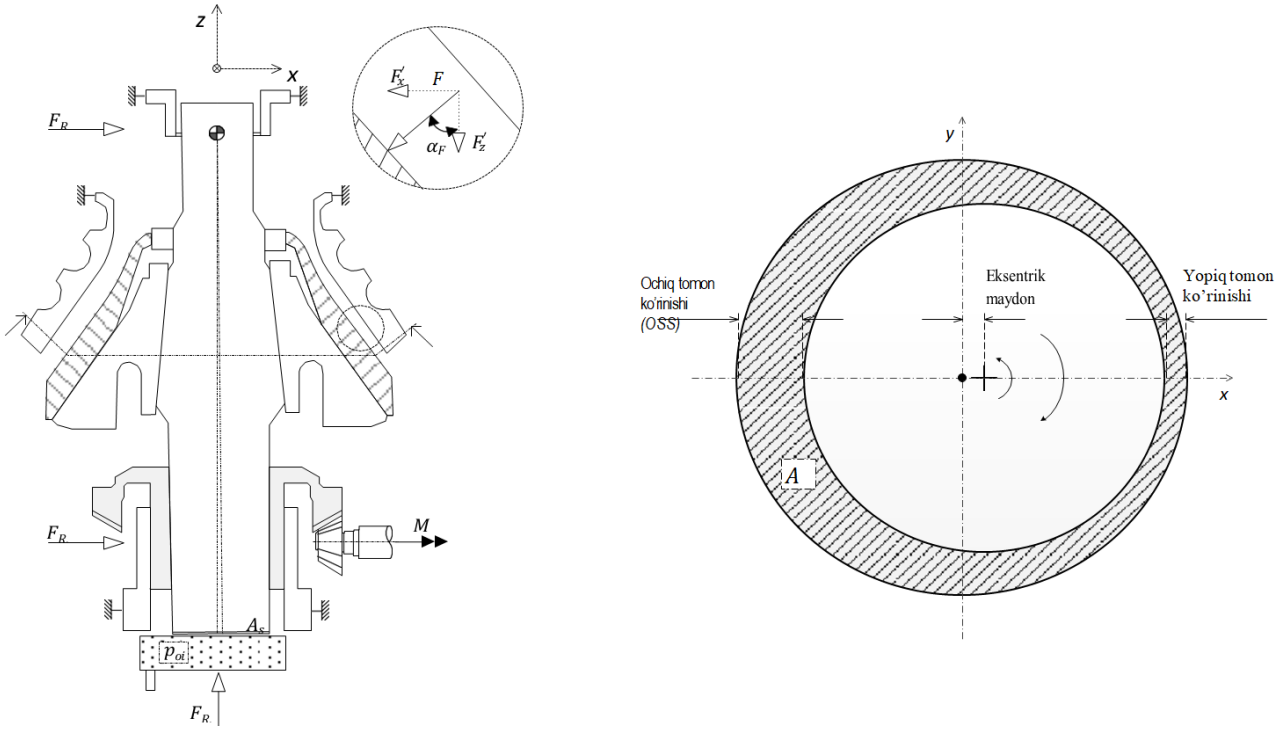
Yirik maydalash uchun konusli maydalagichlar ikki xil bo‘ladi: 400 dan 1300 mm gacha bo‘lgan o‘lchamdagi bo‘laklarni qabul qilish uchun mo‘ljallangan, yuklash tirqishlari 500, 900, 1200 va 1500 mm bo‘lgan yirik birlamchi maydalash uchun KKD tipidagi maydalagichlar kiradi. KKD-1500/180 GRSh, tanlangan konusli maydalagichning texnik parametrlari (*1-jadval*) da keltirilgan.

Ish maqsadi. Yuqori quvvatli maydalash qurulmalari uchun ishlatiladigan elektr yuritmalar asosiy qismi asinxron motor bo‘lib hisoblanadi. Chunki asinxron motor kanstruktiv jihaddan sodda va iqtisodiy jihaddan arzon demakdir.

Hozirgi kunda Navoiy Kon Metalurgiya kombinati, 2-gidro metalurgiya zavodi, rudani maydalash sexidagi yirik konusli KKD-1500/180 GRSh maydalash qurulmasi elektr yurutmasi sifatida AK4-450Y-10UZ markali faza rotorli asinxron motor ishlatiladi (*2-jadval*). Biroq bu turdagi asinxron motorlar bugungi kunda keng foydalanilmaydi. Chunki ularning konstruksiyasi qisqa tutashtirilgan rotorli asinxron motorga nisbattan murakkabligi sababli ommalashmagan.

Ammo yagona afzallik bu tezlik boshqarish imkoni mavjudligidir. Faza rotorli asinxron motorning rotorda joylashgan halqalariga tegib turuvchi cho‘tkalar orqali qarshiliklar ulanilishi hisobiga rotor tezligi rostlaniladi.

KKD-1500/180 GRSh, tanlangan konusli maydalagichning elektr yurutmasi AK4-450Y-10UZ markali faza rotorli asinxron motor texnik parametrlari (*2-jadval*) da keltirilgan.



1-rasm. Konusli maydalagichning vertical va gorizontal kesmaning sxematik rasmi. Tasir etuvchi kuchlarning soddalashtirilgan tasviri va turli xil mexanik sozlamalar tufayli aylanish nuqtasi holatidagi farqlar ham keltirilgan

Asosiy qism. 2-gidro metalurgiya zavodi, 1-sexdagi rudani yanchish qurilmasi AK4-450Y-10UZ markali faza rotorli asinxron motor validagi yuklamaning o'zgarishi asosida quvvatni avtomatik rostlash usulini tadbiq qilish uchun dastlab bir qator ilmiy amaliy tajribalarni bajarish lozib bo'lib sanaladi. Hozirda AK4-450Y-10UZ markali faza rotorli asinxron motor doimiy 24 soat ish rejmida faoliyat ko'rsatib kelmoqda. Kapital tamirlash uchun har 5 oy da bir marotaba 24 soat ishdan tashqari farmoyish joriy qilinadi. Ammo, rudaning qattiqligi, metal qismlarning maydalagichga tushib qolishi, mexanik va elektr jihozlarida yuzaga keluvchi muamolar sababli, kunlik avariya yani favqulotda to'xtab qolish holati kuzatilishi mumkin. Bu turdagi favqulotda to'xtab qolish davri 2 dan 6 soatgacha bo'lgan oraliqda ruxsat beriladi. Maydalagich elektr yuritmasi ishlash davrida o'tginchi jarayonlar va asosiy kattaliklarda yuzaga keluvchi o'zgarishlarni chuqur o'rganish, olib borayotgan ilmiy ishimizni har tomonlama mukammal va kutilayotgan natijalarni aniqroq qo'lga kiritish uchun imkon beradi [2].

Kuzatuvlar natijasida shunga guvoh bo'lish mumkinki, motor valiga ta'sir qiluvchi yuklama, stator cho'lg'amlarida yuzaga keluvchi tok kuchi o'zgarishi bilan uzviy bog'liq. Chunki, valdagi yuklama ortishi rotorda tormozlovchi kuchning ortishiga va iste'mol tokining o'zgarisiga ham sabab bo'ladi (*2-rasm*). Motorda ilgarilanma kuchni hosil qilish va tezlikni saqlash qobiliyatining mavjudligi sababli yuklama ortishi tokning ortishiga olib keladi.

Biroq, yuklamaning haddan tashqari ortishi bir qator muamolarga sabab bo'ladi:

– stator tok kuchining keskin ortishi,
– stator cho'lg'amlarida qizish holatlari,
– valda va podshimniklarda zo'riqmaning ortishi,
– mexanik (tasmali) uzatmada zo'riqmaning ortishi,
– aylanish tezligining kamayishi,
– reaktiv quvvat sarfining ortishi va samaradorlikning pasayishi kabi salbiy muamolar yuzaga keladi.

Shu sababdan rudani yanchish korxonasida ishlab turgan asinxron motor uchun bir qator tokli himoyalar mavjud bo'lib noqulay ish sharoitlari kuzatilgan hollarda maqbul himoyani amalga oshiradi. AK4-450Y-10UZ markali asinxron motor nominal ish rejmida 20-35 A tok kuchini iste'mol qiladi. Yuklama keskin ortishi natijasida tok kuchi chegaraviy qiymatdan ortadi va 70 A dan ortganda (sirius) himoya vositasi orqali vaqt sanab ajratish boshlanadi (*3-rasm*). Agarda tok kuchining qiymati 80 A dan ortsa vaqt sanalmasdan birdaniga tarmoqdan ajratiladi. Chunki, tok kuchining bunday yuqori qiymati stator

1-jadval

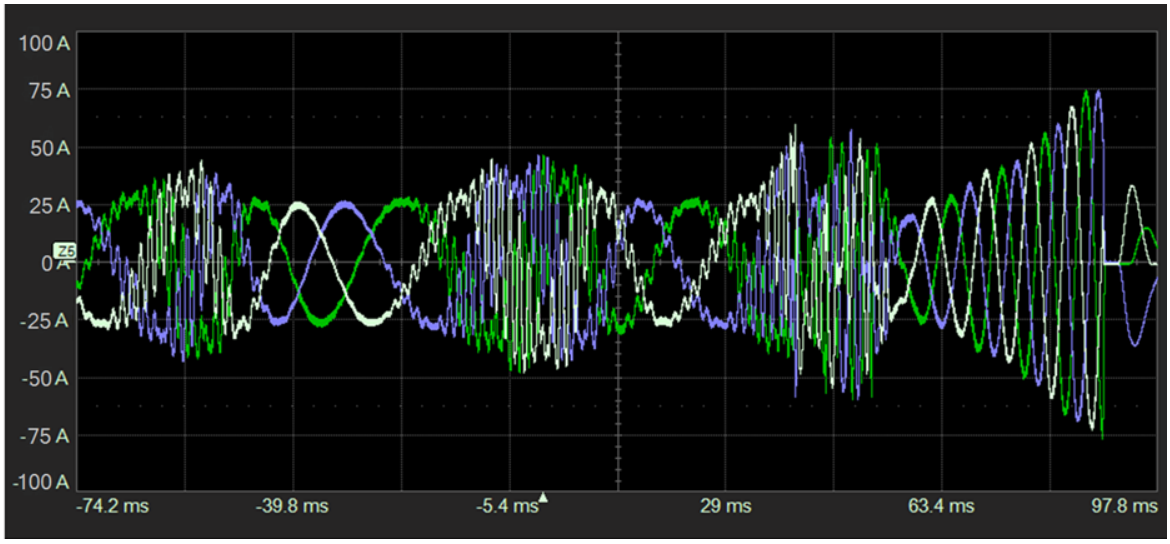
KKD-1500/180 GRSh, tanlangan konusli maydalagichning texnik parametrlari

Parametr	KKD-1500/180 GRSh
Ezuvchi konusning taglik diametri, *mm*	180
Ochiq tomonda qabul qiluvchi teshikning kengligi, *mm*	1500
Yuklangan materialning eng katta o'lchami, *mm*	1200
Ishchi quvvati, m^3/s	2240
Massa, *tonna*	406
Elektr dvigatelining quvvati, *kVt*	400

2-jadval

AK4-450Y-10UZ markali faza rotorli asinxron motor texnik parametrlari

Elekr motor turi	Quvvati (*kWatt*)	Aylanshlar soni (*ayl\min*)	Kuchlanishi (*V*)	FIK (%)	Quvvat koiffitsenti (*cos f*)	Stator toki (*A*)	Rotor toki (*A*)	Maksimal momentning nominalga nisbati (*Mmax/Mn*)
AK4-450Y-10UZ	400	750	6000	92,6	0,83	50	390	6,4



2-rasm. Yuklamasi turg'un bo'lmagan asinxron motor uchun Hmc8015 quvvat analizatori orqali olingan tok kuchi o'zgarishi grafigi

cho'lg'amlarini shikastlab qo'yishi yoki tatmoqda kuchlanish tushuvini yuzaga keltirishi mumkin [3].

Yuqoridagi grafiglarda ko'rinadiki bir soniyadan kichik vaqt oraligidagi tok qiymati turlicha qiymatlar oralig'ida o'zgaradi. Bu o'zgarishning yuzaga kelishi valga tasir qiluvchi yuklama qiymati bilan uzviy bog'liqdir. Yuklamaning o'zgarish holati tushayotgan rudaning hajmi va zichligiga uzviy bo'liq bo'lib sanaladi. Shu sababli, konusli maydalagich energiya iste'moli modelini tekshirish uchun 2-gidrometalurgiya zavodi, 1-sexdagi rudani yanchish qurilmasida KKD-1500/180 GRSh maydalash qurulmasida experimental tajribalari o'tkazildi. Tajriba asosida konusli maydalagich energiya iste'moli, ruda hajmiy taqsimoti va maydalash kamerasining strukturaviy parametrlari o'lchandi. Quyida keltirilgan jadvalda konusli maydalagichning energiya sarfini yuklama sarfi asosida ko'rsatib berilgan. Materialning zichligi o'rtacha qiymatda 2725 kg / m³ deb qabul qilindi. Ruda zarrachalarining o'lchami konusli maydalagichimiz standart talab o'lchamiga mos holda kiritiladi [4].

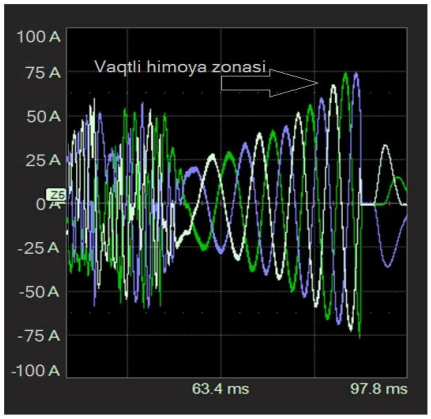
3-jadvalga ko'ra, o'rtacha yuklamasiz konusli maydalagich energiya iste'moli mos ravishda 271,51 *kW* soat va yuklamasi nominal 70 % oraliqda bo'lgan holda iste'mol quvvati 396,64 *kW* soatni tashkil etdi. Simulyatsiya natijasida elektr energiya sarfini (1) tenglama bo'yicha olish ham mumkin. Simulyatsiya natijalari va o'rtacha eksperimental qiymatlar solishtirilganda 1,98 *kW* soat farqni tashkil etdi. Shuning uchun, konusning maydalagichni modellashtirish jarayonida simulyatsiya (Matlab, Simulink dasturiga kiritilgan visual parametrlar) natijalari va o'rtacha eksperimental qiymatlar solishtirilganda energiya sarfini taxmin qilish ko'rsatgichlari orasidagi taffovut kichik bo'lganligi uchun ikkala tadqiqot usuli ham ishlatilishi mumkin [4].

Konusli maydalagichlarning elektr motor quvvati N(kW) ko'plab manbalarda quidagi formula orqali ifodalaniladi.

$$N = \frac{5\beta_{sj}^{2} n d_{2} (d_{H}^{2} - d_{K}^{2})}{24 \mu E 1000} \qquad (1)$$

Bu yerda: β_{sj} -ruda elastiklik moduli, *E*-yanchish davrida ruda bo'laklarining yakuniy mustahkamlik chegarasi, μ-konusli maydalagich foydali ish koeffitsiyenti, odatda bu turdagi qurilmalar FIK 0,7-0,85 oralig'ida bo'ladi, *d* - harakatlanuvchi konusning asosining diametri, d_H va d_K harakatlanuvchi konusning kirish va chiqarish diametri.

Konusli maydalagich energiya iste'moli, rudani parchalash uchun yo'nalgan bosim va bosim yo'nalishi bo'yicha siljishga uzviy bog'liqdir. Shunga ko'ra, ezilish nisbati va mantiya pozitsiyasi almashinish tezligi,



3-rasm. Tok kuchining keskin ortishi

hamda konusli maydalagichdagi maydalash kamerasining strukturaviy parametrlari ham energiya sarfi uchun ta'sir qiladi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, mantiyaning eksentriya bo'yicha tezlikning oshishi bilan energiya sarfini sezilarli pasayish tendentsiyasini kuzatiladi. Shuni takidlash joizki, tezlikning ortishi bir vaqtning o'zida mahsuldorlik uchun ham birlik energiya sarfi pasayishi ko'rildi. Bundan tashqari, yanchish uchun sarf energiyasi tezlik bilan uzviy bog'liqlikka ega [4]. Biroq, energiya iste'moli tezlikning oshishi bilan yuqori tendentsiyani ko'rsatmaydi, ya'ni belgilangan tezlikning chegaraviy qiymatidan ortishi energiya sarfida yana ortishini ko'rsatadi. Energiya iste'moliga konusli maydalagichning yuksiz mexanik energiyasi yoki salt ishlashi ham ta'sir ko'rsatdi: tezlik qanchalik yuqori bo'lsa, yuklamasiz energiya sarfi (reaktiv quvvat uchun) shunchalik ko'p va maydalash vaqtida (nominal yuklangan holda) kamroq energiya sarflanadi. Shuning uchun energiya iste'moli tezlikning oshishi bilan o'zgarishi kuzatiladi [5].

Konusli maydalagich energiya sarfini va ezilayotga rudaning chiqish o'lchamlarini baholovchi yana bir asosiy kattalik bu eksentrik aylanishning og'ish burchak qiymati bo'lib sanaladi (1-rasm). KKD-1500/180 GRSh konusli maydalagich uchun eksentrik aylanish uchun og'ish burchagi 1.6° va 2.5° ni tashkil etadi [8]. Bu burchakning ortishi chiqayotgan mahsulotning o'lchami va energiya sarfining pasayishiga olib keladi. Sababi shundaki, burchakning ortishi hisobiga zo'riqma kamayadi va konusli maydalagich elektr yuritma staror cho'lg'amlaridagi

2-jadval

Konusli elektromaydalagich energiya istemoli va yuklama darajasi

Energiya iste'moli (*kW*)	Yuklama darajasi(%)	Energiya iste'moli (*kW*)	Yuklama darajasi(%)	Energiya iste'moli (*kW*)	Yuklama darajasi(%)
271,51	0	364,46	63,64	384,75	70,95
345,94	52,57	367,97	65,32	386,63	71,67
349,13	58,46	369,89	65,79	389,81	71,89
356,36	59,24	373,58	66,78	393,63	72,45
358,51	60,13	377,41	67,71	394,09	72,91
360,18	60,96	379,66	68,92	395,80	73,14
361,90	62,75	381,35	69,16	396,64	73,78

tok miqdori kamayadi va iste'mol quvvatining kamayishiga o'z tasirini ko'rsatadi [5].

Yuqoridagi rasmdan shuni xulosa qilish mumkinki konus aylanish tezligi va eksentrik burchak bir biri bilan bog'langan holda iste'mol quvvatiga o'z tasirini beradi [5].

Xulosa. O'tgazilgan eksperimental tajriba natijasida shunga guvoh bo'lish mumkunki, konusli maydalagichga tushirilayotgan rudaning miqdori va o'lchami, eksentrik og'ish burchak gradusi hamda konusning aylanish tezligi o'zaro quvvat iste'moliga bog'liqligi va ularni maromlash orqali energiya samaradorligiga erishish imkoni mavjudligi o'z nazariy ispotini ko'rsatdi [5].

Yakuniy xulosa o'rnida aytish mumkinki, 2-gidrometalurgiya zavodi, 1-sexdagi rudani yanchish jarayonida AK4-450Y-10UZ markali faza rotorli asinxron motor validagi KKD-1500/180 GRSh konusli maydalagich ish faoliyati davomida iste'mol quvvatining experimental natijalari tadbiq etildi.

Natijalar orqali konusli maydalagich asosiy parametrlari sanalgan eksentrik og'ish burchagi, aylanish tezligi va unga tushuvchi yuklama miqdori o'zgarishi natijasida AK4-450Y-10UZ asinxron motor iste'mol quvvatida o'zgarishning yuzaga kelishi kuzatildi. Bu asosiy parametrlarni belgilangan optimal qiymatlar orqali maromlash bilan narmal energiy samaradorligi qo'lga kiritilishi mumkin.

Bibliografik ro'yxat:

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. No. 10. October, 2019, pp. 11207-11210.

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. No. 11. November 2022, pp. 2-7.

4. Савина Н.В., Мясоэдов Ю.В. Систематические исследования потер электроэнергии пръи работе распределителних электрических сетей // Вестник. – Москва: ИрГТУ, 2012. № 1. – 148 с.

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. № 3. – Navoiy, 2022. 102-104 betlar.

«GORNIY VESTNIK UZBEKISTANA», 2025. No. 3 (102) pp. 94-97

METHODS FOR IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF CONE CRUSHERS USED IN THE MINING INDUSTRY

Olimov Zh.S., *Assistant of the «Energy» Department.*
Mavlonov J.A., *Head of the Department of «Energetics», PhD in Technical Sciences, Associate Professor.*

Navoi State Mining and Technological University. Navoi, Uzbekistan.

Crushing and grinding of mineral raw materials are widely used in the mining and construction industries and are technological processes that require large amounts of electricity. These processes account for about 20% of the electricity consumed by mining enterprises. Currently, crushing processes are among the most energy-intensive operations, accounting for more than 50–60% of the total energy resources of processing enterprises. Therefore, the selection of equipment aimed at increasing the energy efficiency of the process of ore preparation and development, the use of high-performance equipment with high unit power, the intensification of crushing processes, and the development of technical solutions are highly relevant.

Thus, experimental tests were carried out using the main parameters of a cone crusher (eccentric deviation angle, cone rotation speed, load), and the main priorities were determined to achieve optimal operation and energy efficiency.

Keywords: *jaw, hammer, and cone crushers, electric drives, electric motor power, bottom diameter of the crushing cone, feed opening width on the open side, operating power, hydrometallurgy, asynchronous motor with phase rotor, ore hardness, electric drive, stator current, rotational frequency, reactive power, load level.*

Bibliographic list:

1. Ibodullayev M.I, Tovboyev A.N., Yesenbekov A.K., Nazarov A.I. Frequency-energy relationships in the analysis of autoparametric vibrations // «O'zbekiston Konchilik xabarnomasi» scientific-technical and production journal. – Navoi, 2017. No. 2. pp. 165–167.

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. No. 10. October, 2019, pp. 11207-11210.

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. No. 11. November 2022, pp. 2-7.

4. Savina N.V., Myasoedov Yu.V. Systematic studies of electricity losses during the operation of distribution electrical networks // Bulletin. – Moscow: IrGTU, 2012. No. 1. – 148 p.

5. Mavlonov J.A., Mardonov D.Sh. Methods for increasing the energy efficiency of ore-grinding mills // «O'zbekiston Konchilik xabarnomasi» scientific-technical and production journal. – Navoi, 2022. No. 3, pp. 102-104.

UO‘K 62.21474 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.021

MOYLI TRANSFORMATORLARNI QOLGAN XIZMAT QILISH MUDDATINI BIRLAMCHI PARAMETRLARIDAN KELIB CHIQQAN HOLDA TASHXISLASH



Tog‘aymurodov S.Z.,
NDKTU «Elektr energetikasi» kafedrasi doktoranti

Ataullayev A.O.,
NDKTU «Elektr energetikasi» kafedrasi dotsenti, PhD

Rasulova B.I.,
NDKTU «Elektr energetikasi» kafedrasi doktaranti

Maqola transformatorlarning qolgan umrini joriy ish parametrlaridan kelib chiqib, bashorat qilishga bag‘ishlangan bo‘lib, birlamchi parametrlar hisoblangan: differensial himoya, gazli himoya, tok kuchining tezkor o‘chirilishi, vibratsiya va yog‘ harorati kabi asosiy ko‘rsatkichlarning integratsiyalangan tahlili ko‘rib chiqiladi. Transformatorlar elektr energiyasi tizimlarining muhim qismi sifatida ularning ishlash muddatini oldindan bashorat qilish, potentsial nosozliklarni oldini olish va iqtisodiy samaradorlikni oshirish uchun zarurdir. Tadqiqotning asosiy maqsadi - ushbu parametrlarni mashina o‘rganishiga qaratilgan, xususan,real vaqt monitoringgi orqali transformatorlarni birlamchi parametrlaridan kelib chiqib, transformatorlarning qolgan xizmat qilish muddatini aniqlashdan iboratdir.

Kalit so‘zlar: *bashorat qilish, integratsiyalash, differensial himoya, gazli himoya, tashxis qilish, vibratsiya, yog‘ harorati, akselerometr, mexanik stress,monitoring qilish, izoliyatsiyaning qarishi, radio controller, korelyatsiya, diagnos qilish.*

Статья посвящена прогнозированию оставшегося срока службы трансформаторов на основе текущих эксплуатационных параметров, при этом в качестве основных параметров рассматриваются: дифференциальная защита, газовая защита, токовая отсечка, вибрация и температура масла, а также их интегрированный анализ. Трансформаторы, являющиеся важной частью систем электроснабжения, требуют прогнозирования их срока службы для предотвращения потенциальных неисправностей и повышения экономической эффективности. Основная цель исследования заключается в применении методов машинного обучения, в частности, мониторинга в реальном времени, для определения оставшегося срока службы трансформаторов на основе их первичных параметров.

Ключевые слова: *прогнозирование, интеграция, дифференциальная защита, газовая защита, диагностика, вибрация, температура масла, акселерометр, механическое напряжение, мониторинг, старение изоляции, радиоконтроллер, корреляция, диагностирование.*

Kirish. Elektr energiyasi tizimlarining asosiy elementlaridan biri bo‘lgan transformatorlarning umrini va ishlash muddatini oldindan aniqlab bashorat qilish, transformatorlarning qolgan umrini baholay olish va ularning paralel ravishda ishlashini kuzatish, tarmoq barqarorligini ta‘minlash va iqtisodiy yo‘qotishlarni kamaytirish uchun muhimdir. Transformatorlarning qolgan umri (TQU) yoki Remaining Useful Life (RUL) deb ataladigan bu ko‘rsatkich, ularning ichki holatini aks ettiruvchi turli parametrlarni tahlil qilish orqali aniqlanadi va bu metodologiya bizga transformator ishga tushgan kundan boshlab qolgan umrini baholashga yordam beradi.

Tadqiqot maqsadi va obyekti. Ushbu tadqiqotda biz transformatorning joriy parametrlariga, xususan, differensial himoya ma‘lumotlari, gazli himoya ko‘rsatkichlari, tokoviy otsechka (TO) signallari, vibratsiya o‘lchovlari va yog‘ harorati qiymatlariga asoslanib, TQU (RUL)ni tashxislay olish va joriy parametrlar asosida bashorat qilish usullarini o‘rganamiz.Albbatta bugungi kunda ushbu tadqiqotni olib borish uchun juda ko‘plab transformator turlari mavjud va biz ular orasida eng ko‘p tashxislashga muxtoj bo‘lgan moyli transformatorlar turini tanladik [1].

Avvalo tadqiqotni olib borishda transformatorning birlamchi himoya turlaridan olinadigan signallar va ma‘lumotlarga e’tibor qaratdik.

Moyli transformatorlarning differensial himoyasi – transformatorning oqim farqlarini monitoring qiluvchi tizim bo‘lib, ichki nosozliklarni (masalan, o‘rashlar orasidagi qisqa tutashuvlarni) tezda aniqlaydi. U oqimlarning kirish va chiqish farqlarini solishtirib, normal holatdan chetga chiqishlarni belgilaydi, bu esa transformatorning izolyatsiya holatini baholashda asosiy rol o‘ynaydi. Differensial himoya orqali transformator qolgan umrini baholash bo‘yicha Daniyalik A.A.Alblawi tadqiqotda differensial himoya ma‘lumotlari (oqim farqlari) kirish va chiqish toklar farqiga qarshi chidamli mashina o‘rganishi modellari orqali TQU (RUL) ni bashorat qilishni o‘rgangan.

Differensial himoya ichki qisqa tutashuvlarni aniqlashda asosiy rol o‘ynaydi va modelning aniqligi A.A.Alblawi tomonidan 90%+ ga yetkazilgan. Bunda asosan 1-formuladan foydalangan holda transformatordagi toklar farqi aniqlanib natijaga erishilgan [2].

$$\Delta I = I_{in} - kI_{out} \quad (1)$$

Bu yerda, ΔI – differensial oqim (nosozlikni ko‘rsatadi), *A*;

I_{in} – transformatorning birlamchi o‘ramidagi oqim, *A*;

K – transformatsiya koeffitsienti;

I_{out} – transformatorning ikkilamchi chulg‘amidagi oqim, A.

Differensial himoya va tokoviy otsechka parametrlari elektr nosozliklarini aniqlashda ishlatiladi. 1-formulamiz orqali differensial himoya oqim farqlarini (masalan, 5-10 % chetga chiqishda) kuzatib, ichki buzilishlarni aniqlab olishimiz mumkin bo‘ladi, bu esa transformatorning elektr izolyatsiyasi holatini baholashda muhim. Oqimni uzish esa haddan tashqari tok oqimlarni (masalan, nominal oqimning 150 % dan oshganda) aniqlab, himoya qiladi va bu ma‘lumotlar RUL modellarda yuklanish tarixini hisobga olish uchun foydalaniladi. Bugungi kunda differensial himoya bilan kuzatiladigan himoyalarning ishlashi moyli

1-jadval

Tadqiqotni olib borishda tanlangan quvvati 6300KVA li moyli transformator parametrlar korelyatsiyasini 5D o'lchamda solishtirish uchun namunalar jadvali yog' harorati

Yog' harorati, *ºC*	Vibratsiya, *mm/s*	Toklar farqi, *A*	Ajraladigan gazlar, *PPM*	RUL, *kun*
80	1,5	5	30	1000
80	2,0	10	40	950
80	2,5	15	50	900
80	3,0	20	60	850
80	3,5	25	70	800
90	1,5	5	30	950
90	2,0	10	40	900
90	2,5	15	50	850
90	3,0	20	60	800
90	3,5	25	70	750
100	1,5	5	30	900
100	2,0	10	40	850
100	2,5	15	50	800
100	3,0	20	60	750

transformatorlarda ko'p uchraydi. Bunga asosiy sabab transformatorning ichki izolyatsiya qarshiliklarining eskirishi va fazalardagi qarshiliklarning miqdorlari notengligidan kelib chiqadi [3].

Undan tashqari transformatorlarni mexanik holati haqida ochiq va real informatsiya beruvchi yana bir parameter vibratsiya hisoblanadi. Vibratsiya monitoringgi- transformatorning mexanik holatini aks ettiradi masalan, o'rashlarning bo'shashishi yoki yadro deformatsiyasi vibratsiya darajasini oshiradi, bu esa erta diagnostika uchun muhim.

Ming Zeng, Feng Wu va Yiwei Cheng kabi bir qancha olimlar transformatorning titrashi orqali transformatorni mexanik holatini diagnos qilish bo'yicha tadqiqotlar olib borishgan.

Biroq ushbu izlanishlarning barchasi transformatorning mexanik holati haqidagi birlamchi ma'lumotlarni berardi. Moyli transformatorlarni erta diagnos qilish uchun esa faqat mexanik jihatdan yondashishni o'zi yetarli bo'lmaydi [4].

Har bir elektro texnologik qurilmani temperatura xarakteristikasi bo'lgani kabi, transformatorlarni issiqlik jihatdan xarakterlaydigan narsa bu uning yog' haroratidir. Yog' harorati – transformatorlarning qolgan umrini bashorat qilish sohasida so'nggi yillarda rivojlanib, turli parametrlarga asoslangan modellarni va metodlarni o'z ichiga olgan. Dastlabki tadqiqotlarda yog' harorati asosiy parametr sifatida ko'rib chiqilgan bo'lib, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) standartlari bo'yicha yog' harorati 90ºC dan oshganda izolyatsiya qarish tezligi ikki baravar oshadi deb hisoblanadi.

Masalan, yog' haroratini monitoring qilish orqali transformatorning termal yukini baholash va RULni prognoz qilish usullari ishlab chiqilgan, bu esa ortiqcha yuklanishlarni oldini olishga yordam beradi.

Yog' harorati esa transformatorning issiqlik yukini ko'rsatadi va yuqori harorat izolyatsiya materiallarining tezroq qarishiga olib keladi va bu parametr real vaqt rejimida monitoring qilinadi. Ushbu parametrlarni birlashtirib, biz mashina o'rganishi (Machine Learning) modellari yordamida RULni bashorat qilishni taklif etamiz. Tadqiqotning maqsadi – ushbu parametrlarni integratsiyalangan tizimda ishlatib, transformator umrini aniqroq tashxislay olish va sanoatda qo'llash imkoniyatlarini ko'rsatish [5].

Transformator himoya turlari ichida gazli himoya orqali uning ichki nosozliklari haqida bir muncha aniq xulosalarni olish mumkin bo'ladi. Gazli himoya – ma'lumotlari (Dissolved Gas Analysis – DGA) transformatorning ichki kimyoviy jarayonlarini aks ettiradi. Yog'da gazlarning hosil bo'lishi (masalan, asetilen ichki qisqa tutashuvni ko'rsatadi) Duval uchburchagi usuli orqali tahlil qilinadi va bu ma'lumotlar RUL bashoratini yaxshilaydi.

Gazli himoya yog'dagi gazlarning hosil bo'lishini kuzatadi. Masalan, aralash gazlar (vodorod, metan, asetilen) ichki buzilishlarning belgisidir va bu ma'lumotlar transformatorning termal va elektr stressini ko'rsatadi. Gazli himoya asosida transformatorlarni qolgan umrini bashoratlash bo'yicha bir qancha olimlar tadqiqotlar olib borgan bo'lib, ulardan eng salmoqli natijalarga erishgani Xitoylik olimlar Yan Chen va Cheng Liular hisoblanadi. Ular gazli himoyadan olingan moy konsentratsiyasi ma'lumotlarini transformatorning sog'lik indeksiga bog'liq korelyatsiyasini tadbiq qilishgan.

Tadqiqotlarda gazli himoyani mashina o'rganishi bilan birlashtirib, nosozliklarni 95 % aniqlikka erishgan holda ko'rsatilgan. Ammo bu faqat moyda erigan gaz konsentratsiyasi orqali diagnos qilish metodi edi. Transformatorni qolgan umrini faqat moy holatidan kelib chiqib baholash uning xizmat ko'rsatish umrini to'liq namoyon eta olmas edi.

Moyli transformatorlarning asosiy temperature xarakteristikasini xarakterlaydigan parameter uning moyi bo'lganligi sababli, transformatorlarning izolyatsion moyi uning termik imkoniyatlarini va doimiy harorati haqidagi asosiy infografiyalarni beradi. Bu tashxislar transformatorni to'liq holati haqida diagnos qilish uchun yetarli bo'la olmaydi.

Integratsiyalangan yondashuvlarda ushbu parametrlarni birlashtirib, Probabilistic Machine Learning (PML) modellari ishlab chiqilgan, bu esa TQU (RUL)ni yanada aniqroq bashorat qiladi. Biroq, mavjud tadqiqotlarda parametrlarning real vaqt rejimida birlashtirilishi kam o'rganilgan, barcha parametrlarni bog'lab ularni korelyatsiyasi orqali tashxislash o'rganilmagan, shuning uchun bizning tadqiqot shu bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan [6]. Tadqiqotda transformatorning RULini bashorat qilish uchun quyidagi metodologiya qo'llanilishi yuqoridagi parametrlar korelyatsiyasini aniqroq tavsiflaydi.

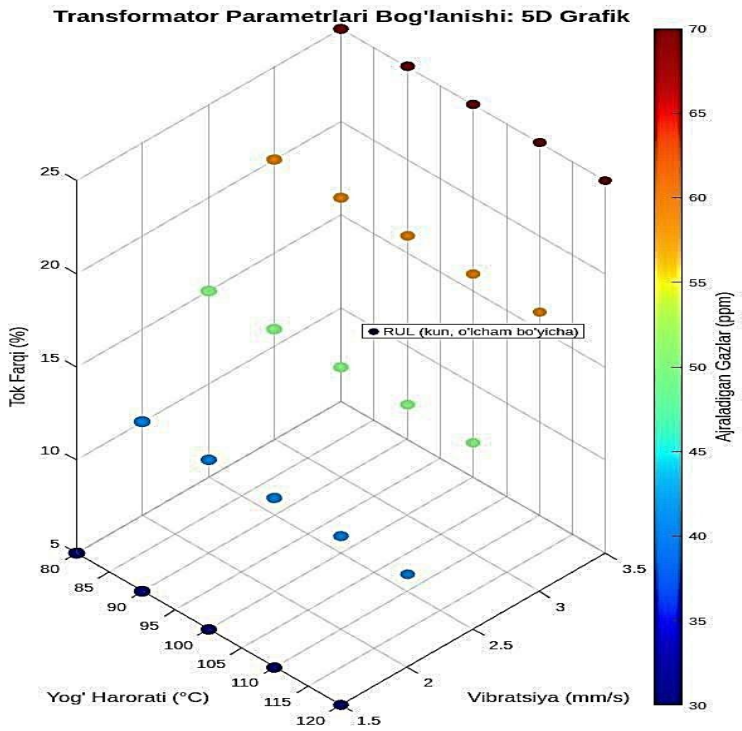
Tadqiqot metodologiyasi. Avvalo, ma'lumotlar yig'ish, real elektr stansiyalaridan differensial himoya loglari (oqim farqlari), gazli himoya ma'lumotlari (gaz kontsentratsiyalari), tokoviy otsechka signallari (oqim qiymatlari), vibratsiya o'lchovlari (*mm/s* birlikda) va yog' harorati (Celsiy darajasida) olinadi.

Bu ma'lumotlar Controller 16*MB*+Wifi,yuqoridagi parametrlarga mos relelar va radio controllerlar barcha ma'lumotlarni jamlab boshqaruv blogiga uzatib olamiz va MATLAB dasturida immitatsion modelimiz bo'yicha qayta ishlanadi.

Immitatsion va reallikdagi tadqiqotlar tafovutlari nisbiy xatoliklari 2 % dan kamayguncha davom ettiramiz. Yuqori aniqlik va real parametrlar tashxislashning eng birlamchi omili bo'lganligi sababli olingan natijalar va qiymatlarni birlar xonasigacha yaxlitlab olamiz.

Ushbu ketma-ketlikni joriy qilinadigan qurilmamizda va MATLAB dasturida imitatsion modellarini bir vaqtda sinab, tadqiqot o'tkazishimiz mumkin bo'ladi.

MATLAB SIMULINK dasturi yordamida har bir parameter uchun kerak bo'lgan datchiklar, himoya vositalari, birlamchi relelar konfigu-



2-rasm. Sharli tegirmon barabanidagi bitta shar yanchish harakatini diagrammasi

ratsiyasi hamda o‘lchov transformatorlarining shartli belgilarini boshqaruv controlleriga jamlab olamiz hamda yopiq tarmoqni ishlash jarayonini kuzatamiz.

Moyli transformatorlarni erta diagnos qilish uchun ushbu qurilmamizning immitatsion modeli parametrlarni yuqori aniqlikda hisoblashi zarur chunki hisoblashlardagi xatoliklar katta bo‘ladigan bo‘lsa bu qurilmaning shikastlanishiga va nisbiy xatolikni oshib ketishiga sabab bo‘ladi. Qurilmamizni real konstruksiyasi transformator podstansiyalarida joylashtirilishi mumkin bo‘ladi.

Transformatorning o‘zidan olinadigan ya’ni temperature va vibratsiyaning qiymatlari radio datchiklar yordamida transformator podstansiyasining boshqaruv controlleriga yuborish orqali tahlillanadi. Ulanishlar va tarmoq iyerarxiyasida qandaydir nuqsonlar yoki xatoliklaqr bo‘lsa albatta dastur bu haqida bizga bildiradi va tarmoqning ishlamay uzilish borligini ko‘rsatib turadi.

Boshqaruv controllerimiz relelardan olingan barcha ma’lumotlarni jamlab ularni foizlar kesimida transformatorning qolgan umri uchun xavf tug‘dirish darajasini ko‘rsatib beradi.Integratsiyalangan yondashuvning eng asosiy ustunliklarini ayni shu sezgir qurilmalarimiz tashkil qiladi.O‘tkazilgan tadqiqotlar natijasida shikastlanishning umumiy qiymatlarining 80% ga yaqin hodisalari qurilmamiz orqali aniqlashimiz mumkin bo‘ladi.

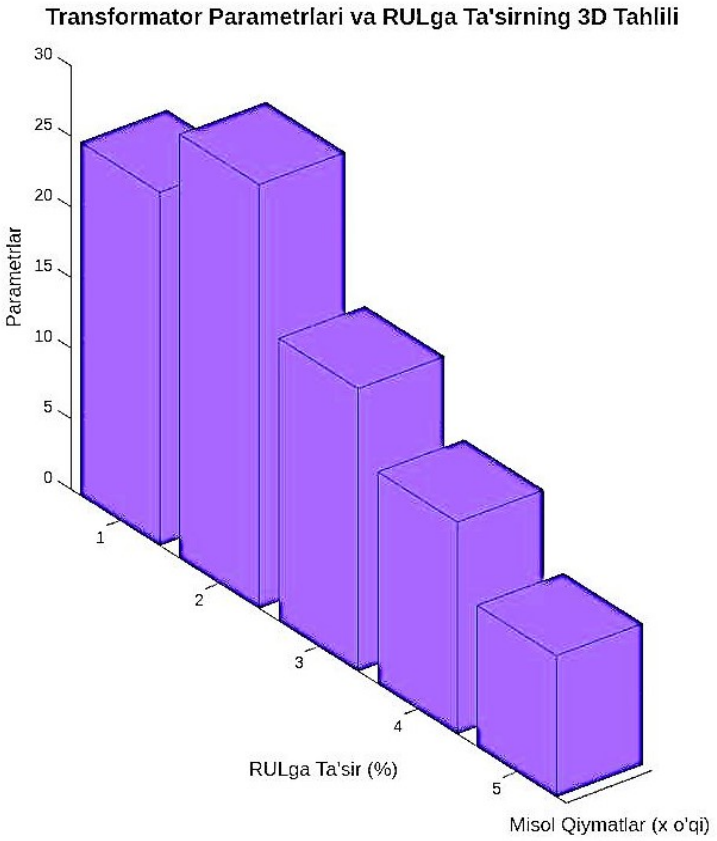
Bu ishlab chiqarish korxonalari va yirik quvvatni taqsimlovchi nimstansiyalar uchun ancha sezilarli ko‘rsatkich hisoblanadi. Moyli transformatorlarni shikastlanish sabablarini hamda ularning qolgan xizmat qilish muddatini aniqlashning bir qancha zamonaviy metodlari orasida ushbu usul ancha samarali va xavfsizdir. Hozir quvvati 6300KVA lik transformatordan olingan namunalar asosida jarayonni kuzataylik. *1-jadvalda* yog‘ harorati, vibratsiya, toklar farqi, ajraladigan gazlar miqdori va moyli transformatorning qolgan xizmat qilish muddatining quymatlari ko‘rsatilgan [7].

Tadqiqotni olib borishda biz quvvati 6300KVA bo‘lgan moyli transformatorni tanlab oldik va uni pasport malumotlari asosida taqqoslaydigan bo‘lsak undagi tafovutlar bir qancha ekanini ko‘rishimiz mumkin.

2-jadval

Transformator birlamchi parametrlarini RUL ga bog‘liqlik qiymatlari

Parametrlar	Tushintirish	Ta‘sir TQU ga, %	Misol qiymat
Gazli himoya	Yog'dagi gazlarni tahlil qilish, kimyoviy buzilishlarni ko‘rsatish	30% qisqarish (asetilen >50 *ppm*	Gaz kontsentratsiyasi = 60 *ppm*
Tokoviy otsechka	Haddan tashqari oqimlarni aniqlash, yuklanishni himoya qilish	20% qisqarish (oqim >150%)	Oqim = 160 % nominal
Vibratsiya	Mexanik stressni o'lchash, deformatsiyalarni belgilash	15% qisqarish (vibratsiya >2 *mm/s*)	Vibratsiya = 2,5 *mm/s*
Yog‘ harorati	Issiqlik yukini monitoring qilish, qarishni tezlashtirish	10% qisqarish (harorat >95°C)	Harorat = 98°C
Differensial himoya	Oqim farqlarini monitoring qilish, ichki qisqa tutashuvlarni aniqlash	25% qisqarish (farq >10 %)	ΔI = 12 %



2-rasm.Transformator parametrlarining RUL ga bog'liqlik 3D tahlili

Transformator yuklamasi, harorati, titrashi, toklar farqining oniy qiymatlarini va moyda ajraladigan gazlar miqdorini umumiy 15 marotaba tekshirishlar natijasida *1-jadvalimizni* tuzib oldik.

Tadqiqotlar va o'rganishlar shunga dalil bo'lyaptiki transformator, yuklamasi oshgani sari undagi moyning harorati proporsional ravishda ko'tarilib, moyda erigan gazlar miqdorini oshishiga sabab bo'lar ekan. Gaz konsentratsiyasining oshishi esa o'z navbatida o'ramlarning izolyatsion holatini yomonlashuviga sabab bo'lib, bu moyda qisman razryadlanish, chaqnash kabi qisqa muddatli uchqunlarni yuzaga kelishiga sababchi bo'ladi.

Titrash ham yuqoridagi omillarning ayni korelyatsiyasidir. Dastlab parametrlar nominalga yaqin holda bo'lgan vaziyatda transformatorning qolgan maksimal umri 1000 kungacha yetishi mumkinligi diagnos qilindi. Yuklama va boshqa parametrlar oshgani sayin bu ko'rsatkich kamayib bordi.

Parametrlarni kengaytirib tushuntiradigan bo'lsak differensial himoya ma'lumotlari oqim farqlarini (ΔI = I_kirish – I_chiqish) hisoblab, nosozlik chegarasini (masalan, 10 %) belgilaymiz. Gazli himoya yog'dagi gazlarni (ppm birlikda) o'lchab, Duval usuli bo'yicha nosozlik turini aniqlaymiz. Tokoviy otsechka oqim qiymatlarini (Amper birlikda) monitoring qilib, himoya chegarasini (masalan, 120 % nominal) belgilaymiz. Vibratsiya akselerometrlar yoki akkustik mikrafon datchiklari orqali o'lchanadi va chastota spektri tahlil qilinadi.

Yog' harorati termopara sensorlari orqali o'lchanadi va issiqlik modellari bilan bog'lanadi. Bashorat modeli uchun Long Short-Term Memory (LSTM) neural tarmoqlaridan foydalaniladi, chunki ular vaqt ketma-ketligidagi ma'lumotlarni yaxshi qayta ishlaydi.

Ma'lumotlar tozalanganidan so'ng, model o'qitiladi va RULni kunlarda bashorat qiladi. Tajriba uchun dastlab 1ta transformatorning ma'lumotlari ishlatildi,tadqiqotimizni obyekti sifatida asosan yirik quvvatli moyli transformatorlarni tanlab olamiz. Ulardan 70 % o'qitish, 30 % test uchun ishlatiladi. Tadqiqotimiz nisbiy xatolik 8 % dan kamayguniga qadar davom ettiramiz chunki xatolikllar qiymati 8 % dan oshsa natijalar haqiqatdan yiroqlashib boradi [8].

Tajriba natijalariga ko'ra, integratsiyalangan model TQU(RUL)ni o'rtacha 92 % aniqlik bilan bashorat qildi. Masalan, yog' harorati 100ºC dan oshganda umr 20 % qisqarishi aniqlandi, gazli himoya ma'lumotlari esa ichki nosozliklarni erta ko'rsatdi. Vibratsiya darajasi 3 *mm/s* dan oshganda mexanik buzilishlar sodir bo'lib, TQU(RUL)ni 15 % kamaytirdi.

2-jadvalda gazli himoya, vibratsiya, moy harorati, toklar farqining oniy qiymatlari hamda tokoviy otsechka qiymatlarining transformatorning qolgan xizmat qilish muddatiga ta'siri ko'rsatilgan.

Differensial himoya va tokoviy otsechka signallari elektr yukini ko'rsatib, modelning sezgirligini oshirdi. O'rganilishlarimizga ushbu yuqoridagi parametrlar transformatorlarning ayni sog'lik indeksiga ta'sir ko'rsatuvchi omillar hisoblanadi va *2-jadvalimizdan* ko'rinadiki gazli himoyaning korelyatsiyasi transformatorning qolgan umriga eng ko'p ta'sir ko'rsatadigan omil bo'ladi.

Moyda erigan gazlarning miqdori tobora ortib borishi bilan uning umri qisqaradi va bu asta sekin moy izolyatsiyasing eskirishi moy burchak tangensini ortib borishiga sabab bo'ladi. Vibratsiya esa bu asosan mexanik nuqsonlarni ifodalab u 15 % gacha transformator umrini qisqarishiga sabab bo'ladi.

Qolgan parametrlarni ham ayni mutanosib qiymatlarini *2-jadvalimizda* ko'rishimiz mumkin. Bu jadvalda kutilmagan va tasodifiy shikastlanishlar hisobga olinmagan chunki bashoratlashda ehtimollar nazariyasiga asoslangan holda mavjud qiymatlardan kelib chiqib tashxislanadi. Ushbu erta tashxislash usuli moyli transformatorlarda kuzatiladigan eng ko'p nuqsonlar va favqulodda holatlarga asoslanib tuzilgan [9, 10].

Xulosa. Ushbu tadqiqot transformator TQU(RUL)ni joriy parametrlardan kelib chiqib bashorat qilishning samarali usulini ko‘rsatdi.

Differensial himoya, gazli himoya, tokoviy otsechka, vibratsiya va yog‘ harorati ma‘lumotlarini integratsiya qilish orqali aniqlik oshiriladi va sanoatda qo‘llash imkonini beradi. Kelajakda bunday modellarni avtomatlashtirilgan tizimlarda ishlatish tavsiya etiladi.

Transformatorlarni joriy holatini ish jarayonidan uzilmasdan turib diagnos qilish va tashxislash, bu nafaqat ish samaradorligi oshiradi balki xodimlarning xavfsizligini ham ta‘minlashda ustuvor xizmat qiladi. Yuqoridagi tadqiqotlar va natijalarga suyangan holda katta quvvatli moyli transformatorlarni TQU metodi yordamida diagnos qilish va LSTM dan foydalanish kabi jihatlari uchun ham ishonchlidir.

Ushbu tadqiqotni yanada mukammallashtirish maqsadida tekshirishlar va tashxislashni inson omilisiz va masofadan boshqarish yanada samarali va ishonchli bo‘ladi. Albatta buning algoritmi va integratsiyasini keyingi tadqiqotlarimizda chuqur davom ettirammiz [11, 12].

Bibliografik ro'yxat:

1. Tog‘aymurodov S.Z. Transformatorlarning ishlash jarayonlarida temperaturaning o‘zgarishi va uning ta’siri natijasida magnit o‘zakning ferromagnet xususiyatini yo‘qotishsabablari // «Journal of Advances in Engineering Technology». Vol. 6 (18), 2025. April-June, pp. 37-41.

2. Бабурин С.В., Жуковский В.Л., Коржев А.А., Кривенко А.В. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин // Горное оборудование и электромеханика. № 9. – М.: Новые технологии, 2009. – С. 34-38.

3. Ibrohimov U. Elektr mashinalari // Oliy o‘quv yurtlari uchun darslik. 2-qayta nashr. – Toshkent: «O‘qituvchi», 1988. – 372 bet.

4. Turdibekov K.X., Sulliev A.X., Iskandarova O.S., Boboqulov J.S. Experimental and statistical methods for studying the modes of electric power systems under conditions of uncertainty // «E3S Web of Conferences». № 1. – Vol. 452, EDP Sciences, 2023, pp.1-6.

5. Гольдберг О.Д. Повышение эксплуатационной надежности электродвигателей в сельском хозяйстве // Электротехника. № 1. – М.: АО «Фирма Знак», 1984. – С. 22-23.

6. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2008. – 128 с.

7. Denmukhammadiev A.M., Yusupov D.T., Shoyusupov Sh.A., Djalilov A.U. va boshq. (2022). Diagnostics of power transformers operating for many years in the power supply system through gases in the composition of transformer oil. Journal of Physics: Conference Series, 2176, 012064.

8. Yusupov D.T., Ismoilov I.K., Tursunov D.A., Zhabborov B.T. (2023). Express diagnostics of power oil transformers by vibroacoustics and partial discharges. 3S Web of Conferences, 434 (Icecae2023), 01027.

9. Ali M.S. (2023). Conventional methods of dissolved gas analysis using oil – review and classification of fault diagnosis techniques. Journal of Loss Prevention in the Process Industries (review article), 2023.

10. Zhang, Y. (2022). Fault diagnosis of transformer using artificial intelligence: a systematic review. Frontiers in Energy Research, 2022.

11. Pyrmatov, N.B., Abdullabekova D.R. Existing methods for monitoring power autotransformers. Technical Science and Innovation. – 2023. – № 4. pp. 35–41. DOI: 10.51346/tstu-02.23.4-78-0093.

12. Belmecheri H., Mekhaldi A. Dielectric properties of transformer oil under thermal aging: frequency and temperature Dependence. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2017. – Vol. 24, № 5, pp. 2893-2902. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006521.

UDK 62.21474

DOI:10.54073/GV.2025.3.102.022

DETAILED OVERVIEW OF ELECTROMAGNETIC PROCESS ANALYSIS IN VSI-FED INDUCTION MOTOR SYSTEMS



Ataullayev N.O.,
Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, NSMTU, PhD

Rasulova B.I.,
PhD student of the Department of Electric Power Engineering, NSMTU

Tog'aymurodov S.Z.,
PhD student of the Department of Electric Power Engineering, NSMTU

Kuchlanish manbali invertorlar (VSI) va induksion motorlar (IM) ni birlashtirgan tizimlardagi elektromagnit jarayonlarni tahlil qilish murakkab vazifadir, chunki kuch elektronikalari va elektromexanik komponentlar o'rtasidagi o'zaro ta'sir murakkabdir. An'anaviy sinusoidal ta'minot tizimlaridan farqli o'laroq, invertor bilan boshqariladigan harakatlantiruvchi tizimlar tez o'zgaruvchan elektr sharoitlarida ishlaydi, bu esa motorning dinamik xatti-harakatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Bitta impuls-eni modulyatsiyasi (PWM) sikli davomida invertor bir nechta kommutatsiya holatlaridan o'tadi, ularning har biri o'ziga xos quvvat zanjiri konfiguratsiyasini ifodalaydi va har birining kuchlanish va tok to'lqin shakllariga ta'sirini aks ettirish uchun alohida modellashtirilishi kerak. Bundan tashqari, induksion motorning elektr parametrlari rotor tezligi, yuk momenti, sirpanish va ta'minot chastotasiga qarab dinamik tarzda o'zgaradi, bu esa aniq modellashtirishni yanada murakkablashtiradi. Ushbu maqolada shunday elektr haydovchi tizimlardagi elektromagnit hodisalarni tahlil qilishning ilg'or usullariga, xususan, induksion motordagi toklarni aniqlashga bag'ishlangan ko'plab yondashuvlar ko'rib chiqiladi. Bu usullar xilma-xilligi invertor bilan ta'minlangan asinxron motor tizimlarining noaniqligi va vaqt bo'yicha o'zgaruvchanligini hisobga olish uchun qo'llaniladigan turli matematik yondashuvlarni aks ettiradi.

***Kalit so'zlar**: kuchlanish manbali invertor (VSI), induksion motor (IM), eektromagnit jarayonlar, Impuls-eni modulyatsiyasi (PWM), kommutatsiya holatlari, matematik modellashtirish, nolinear dinamika, vaqt bo'yicha o'zgaruvchan parametrlar, elektr haydovchi tizimlar, garmonik tahlil, o'tkinchi rejimlar, motor toki simulyatsiyasi.*

The study of electromagnetic phenomena in a system with voltage source inverters (VSIs) and induction motors (IMs) is a problematic task because of a complicated interrelation between power and electromechanical devices. Compared to a standard sinusoidal supply system, drives powered by inverters do not operate under constant conditions, but rather simulation to fuel that is highly dynamic, and can therefore have a huge impact on the dynamic performance of the motor. There are several, and consecutive, switching states of the inverter within the duration of one pulse-width modulation (PWM) signal, each switching state must be modelled separately to allow the identification of its contributions to the voltage and current waveforms. Moreover, electrical parameters of the induction motor are dynamic with the rotor speed, the load torque, and slip and frequency of the supply and therefore difficult to model. In this paper, the review of a few advanced approaches to analysis of electromagnetic phenomena in electric drive systems is given, and the focus is on computational determination of currents in the induction motor. This variation in techniques reflects a variety of mathematical approaches to deal with the nonlinearities and time varying nature of the dynamics of inverter-fed asynchronous motor systems.

***Keywords**: voltage Source Inverter (VSI), induction motor (IM), electromagnetics processes, pulse-Width Modulation (PWM), switching States, mathematical Modeling, non linear Dynamics, time-Varying Parameters, electric drive systems, harmonic Analysis, transient Regimes, motor Current Simulation.*

The electromagnetic study of systems with voltage source inverters (VSI) and induction motors (IM) is very challenging since the two types of elements interact very closely, namely, the power electronic and the electromechanical components. Inverter fed machines are operating in fast-varying electrical conditions commonly not considered in the steady-state analysis as in traditional sinusoidal supplies based systems.

Each pulse-width modulation(PWM) cycle can involve a variety of possible inverter states. Every state has a distinct arrangement of the power circuit, the various arrangements should be modelled independently to consider its effect on voltage waveforms and load current. Moreover, induction motor adds to this extra complexity by the fact that its electrical characteristics are not constant with rotor speed, load torque, slip, and supply frequency. To accurately model and simulate such systems it is important to apply advanced methods that capture these nonlinearities and time variability.

The multitude of the ways to analyze electromagnetic processes in systems with stand-alone voltage source inverters (VSIs) is the result of different ways to mathematically describe the mentioned processes. The above phenomenon makes this complex because there are so many switching states of the inverter circuit in just one repetition period and the problem of accurately considering the parameters of the asynchronous motor that also depend on the rotor speed. We will review some of the potential methods of analysing electromagnetic phenomenon in the systems of electric drive below namely in determining and calculating the induction motor currents.

Instantaneous Value Method.

Instead of the rotating asynchronous motor, the instantaneous value method is founded on the approximating rotation asynchronous motor as the series connection of resistance and inductance (R-L load). This is a good method in estimating means of currents that go into the inverter switches. Nevertheless, it creates serious inaccuracies when calculating

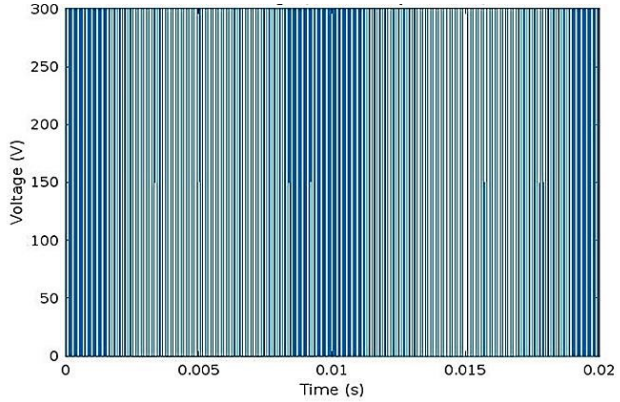


Fig. 1. PWM of voltage

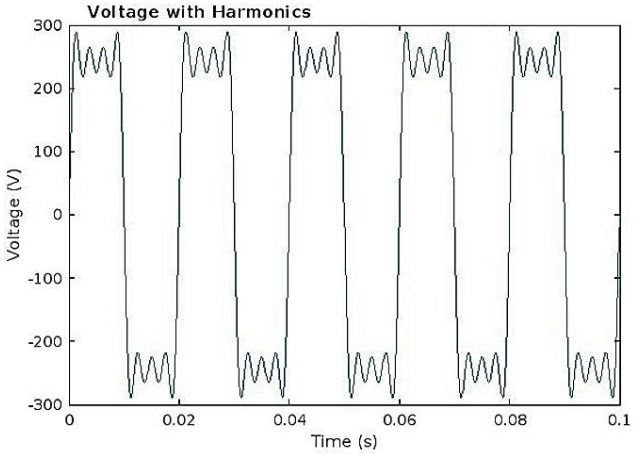


Fig. 2. Voltage with Harmonics

the instantaneous current waveform in the motor i(wt) due to the failure to take into account the peculiarities of operating characteristics of the induction motor that cannot be compared to a simple R L load.

Particularities of Motor Load Compared To R-L Load**.**

By contrast, unlike a fixed R-L load, the motor load parameters not only depend on the power supply, but are also affected in a large range by the mechanical characteristics of the motor. Induction motor is not an ordinary variable R-L load driven with non-sinusoidal voltages. In the case of fundamental harmonic, the load may be described in terms of equivalent parameters between Req and Leq and varies with the operation mode of the motor. In the case of higher harmonics, the motor will act as per its short-circuit parameters that are dependent upon the operating conditions too.

Method of Harmonic Superposition.

[1] discusses the harmonic superposition method as the way to calculate motor current in case of non-sinusoidal voltage supply. The approach breaks the inverter voltage waveform into a Fourier series. Either harmonic current is calculated individually based on a respective equivalent circuit model of each one, and the sum of currents is equal to their combination. The approach can be characterized as very time-consuming, whereas this approach makes it possible to give a careful consideration of the details of the motor load.

Direct Differential Equation Solution Method.

Direct method of solving the differential equation [3,4,5]: It is the method of formulating and solving differential equations in time range wherein the circuit parameters are presumed to keep the same value. The solution is then carried out in sequence beginning with a known currents and voltages at some initial time.

This technique is very general and capable of representing electromagnetic processes in any system including regulated AC drives. Its application becomes a great deal because of the availability of computational tools and standard software. The complexity of the method as well as enormous computational requirements are major disadvantages of the method, and the method fails to obtain a general analytical analysis but a problem-specific result which is known system parameters.

The Finite Difference Method.

In [2], a finite difference approach refers to the building and solving of difference Equations which are used to connect instantaneous values of functions at discrete time values (separated by one period of repetition). Contrary to the direct method of solution to the differential equation, this method enables a study to be conducted in a generalized manner thus making the analysis of systems and synthesis of the control devices much easier. But also has limits: it is inapplicable to processes of variable frequency, and the construction of difference equations may be complicated. Moreover, to the extent that the repetition period involves duration of intervals given by different differential equation systems--whose duration is a function of circuit processes, the method is inapplicable so even to fixed output frequencies.

Always Approximation Technique.

Continuous approximation The continuous approximation method [4,5] divides currents and voltages into two components: a continuous component which carries the larger proportion of the energy in the load (depending on the type of load, this may be a DC component, or it may be the fundamental harmonic) and internally acts as noise, and a variable component that acts as internal noise, and whose effect is limited by the reactive elements of the system.

This approach is characterized by the ease of using it to analyze a circuit with standalone inverters and allows application of automatic control theory. It is accurate enough to be used in engineering calculations, and by this means it permits the obtaining of analytical dependencies in a general form.

Methods and Properties of Analysis.

Instantaneous Value Method (IVM).

In this technique, the assumption is that the motor can be treated as a linear R-L load so all of the nuances of rotor dynamics, the rotation of the magnetic field, and slip can essentially be ignored. The point really is to reduce the electrical model to a point where:

Voltage and current is computed by means of laws by Ohm and Faraday.

The electromechanical feedback is disregarded.

Its average voltage or instantaneous voltage is used to approximate the inverter output.

Advantages:

Very easy and quick to implement in simulation platforms such as MATLAB/Simulink.

It will give fairly realistic estimates of average currents and switching characteristics.

Appropriate at the early design phase, justification stage and prototyping of controllers.

Limitations:

Ignores, the rotating magnetic field and rotor slip which inherent in the induction machines.

Are unable to simulate dynamic, or transient response effects (e. g. startup, load variation).

Not suitable to harmonic analysis or torque prediction.

Shortly put, this approach can only be applied when a reduced model of the system would serve its purpose: in constant state or low dynamics.

Superposition Method of Harmonics.

The considerations involving the fact that inverter output voltage is

non-sinusoidal and full of harmonics owing to PWM are reflected by the superposition or the Fourier method [4,5]. In Fourier theory any wave can be represented as a sum of sinusoidal harmonics:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot \sin(nwt + \varphi_n) \quad (1)$$

Each harmonic component causes a current $i_n(t)$ in the motor, which depends on the motor's impedance at that frequency. Since the motor's equivalent circuit varies with frequency, the impedance seen by each harmonic differs. Typically:

The fundamental is modeled with equivalent resistance R_{eq} and inductance L_{eq}

Higher harmonics are modeled using a short-circuit equivalent, modified for skin effect and iron loss.

Total current is calculated as the sum of all harmonic currents:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) \quad (2)$$

Advantages:

Records frequency dependent behaviour of the induction motor,

Permits harmonic analysis, harmonic loss, and thermal modelling,

helpful in testing power quality and filter needs.

Disadvantages:

Many harmonics are computationally very costly,

Needs a precise information about harmonic impedance,

Disregards time-domain transients (can be used in analysis of steady-state only). The procedure is especially good in modelling steady -state current distortion, additional losses and electromagnetic compatibility (EMC) problems.

In the case of an induction power machine this approach is extended to solve the complete electrical and mechanical equations, comprising rotor dynamics, electromagnetic torque and arguably magnetic saturation.

Implementation Steps:

Determine every unique switching intervals of the inverter,

In every interval, make relevant set of differential equations and solve the set.

To update initial conditions at every transition according to previous values.

Advantages:

Exceedingly high precision at steady state and transient,

Records non-linear behaviour such as magnetic saturation or loading variable torque,

To real-time digital simulation and design of embedded controllers.

Disadvantages:

It is tedious and cumbersome to implement manually,

These solutions do not have a general form (only exist with preferred conditions of inputs),

Needs a good numerical solver and good step sizes.

This approach is most suitable with the transient behavior playing a fundamental role- e.g., with motor start-up, braking, and quick variation of speed. Finite Difference Method (FDM) [6]

The finite difference method is a numerical approach that discretizes time-domain differential equations using difference approximations. For example, the derivative is approximated as:

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t_{k+1}) - x(t_k)}{\Delta t} \quad (4)$$

The system is then modeled as series of algebraic difference equations which are solved iteratively at discrete time times. The method has a certain affinity with digital simulation and embedded implementation.

Advantages:

Simply applicable in the real time control algorithms,

Needs a lot less computing resources than complete ODE solvers,

Naturally discrete-time design of control systems.

Disadvantages:

Step size- and numerically unstable,

Can cause error in approximations particularly high switching systems,

Not feasible on variable-structure model (e.g. inverter switching events).

Such approach should work best when emulating or working with DSPs or FPGAs in power electronics.

Electromagnetic analysis of systems using voltage source inverter-based controls supplying induction motors is naturally enjoying complex aspects of the interaction between fast switching power electronics and dynamic electromechanical model of the motor. As compared to the traditional sinusoidal case in which the supply source is sinusoidal, inverter-fed drives operate under non-stationary electrical conditions and must be modeled in detail with multiple inverter switching states per PWM cycle.Worse still, the parameters of the induction motor also vary continuously with rotor speed, load torque, slip and supply frequency, consuming more nonlinearity and time dependence. Consequently, proper simulation requires sophisticated modeling methodology capable of encoding such complexities to give credible estimation of the systems behaviors.

The choice of an adequate analytical or numerical tool is the key to designing efficient, robust and high-performance drive systems, i.e. capable of capturing both the switching dynamics of the inverter and the varying properties of the motor.

It is only by the means of such extensive strategies that engineers can get a precise control, maximum performance and correct fault diagnosis in contemporary applications of VSI-fed induction motors.

Bibliographic list:

1. Titus J., Harikrishnan P., & Hatua K. (2020). An SCR-based CSI-fed induction motor drive for high power medium voltage applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(6), pp. 4657-4666.

2. Gorla A. & Serkies P. (2025). Comparative study of analytical model predictive control and state feedback control for active vibration suppression of two-mass drive. Actuators, 14(5). – 254 p.

3. Zerdani M., Ardjoun S.A.E.M. & Chafouk H. (2025). Overview of dual two-level inverter configurations for open-end winding machines: Enhancing power quality and efficiency. Applied Sciences, 15 (10). – 5611 p.

4. Zerdani M., Ardjoun S.A.E.M. & Chafouk H. (2025). Overview of dual two-level inverter configurations for open-end winding machines: Enhancing power quality and efficiency. Applied Sciences, 15 (10). – 5611 p.

5. Bimbhra P. S. & Kaur S. (2002). Power Electronics (3rd ed., pp. 309-310).

6. Ribickis L. & Zabasta A. (2014). Power Electronics. Riga: Riga Technical University. – 176 p.

SOYIB ABRURAHMONOVICH ABDURAHMONOV

80

S. Abdurahmonov 1945-yili 8-aprelda Andijon viloyati Shahrixon tumaniga qarashli Axmadbek qishlog‘ida tug‘ilgan. 1961-yili o‘rta maktabni a’lo baxolar bilan tamomlab, Toshkent politexnika institutining Kon-metallurgiya fakultetiga qarashli yangi tashkil etilgan “Rangli metallar metallurgiyasi” mutaxassisligiga o‘qishga kirdi va 1966-yilda muvaffaqiyatli yakunladi. Talabalik yillarida ilmga tashnaligi sezilgan Soyib Abdurahmonov, o‘zi o‘qigan “Rangli metallar metallurgiyasi va foydali qazilmalarni boyitish” kafedrasida stajyorlikka olib qolindi.

1967-yildan 1970-yilgacha ToshPI ning kunduzgi aspiranturasida o‘qidi va “Oqava suvlar tarkibidagi simobni ionli flotatsiya usulida ajratib olish” mavzusida fan nomzodligi dissertatsiyasini muvaffaqiyatli himoya qildi.

1971-yildan ToshPI ning “Rangli metallar metallurgiyasi” kafedrasida assistent, 1973-yilda katta o‘qituvchi, 1976-yilda dotsent lavozimlarida ishlay boshladi. S.A. Abdurahmonov 1977-yildan 1995-yilgacha kafedra mudiri lavozimida ish olib bordi.

Shu yillar orasida sobiq ittifoq respublikalarida mavjud bo‘lgan turdosh kafedralar (jami 30 ga yaqin) bilan ijodiy aloqa o‘matildi. 1976-87-yillarda Moskvada tashkil etilgan ilmiy-metodik kengash a’zosi sifatida faoliyat ko‘rsatdi.

Ustoz, professor Soyib Abdurahmonovich Abdurahmonovning Navoiy shahridagi ilmiy-pedagogik faoliyatini O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti I.A. Karimovning 1995-yil 5-iyuldagi Farmoni asosida Navoiy shahar 2-hunar texnika bilim yurti negizida Navoiy davlat konchilik instituti tashkil etilishi bilan bog‘lasak, maqsadga muvofiq deb hisoblaymiz. Shu bilan birga 2001-yilning 12-aprelida mamlakatimiz rahbarining “Kon-metallurgiya sanoati uchun yuqori malakali mutaxassislar tayyorlashni tashkil qilishni takomillashtirish choratadbirlari to‘g‘risida”gi Qarori qabul qilindi. Ushbu qarorga muvofiq Navoiy davlat konchilik instituti “Qizilkumnodirmetalloltin” davlat konserni tarkibiga o‘tishi va keyinchalik NKMK tasarrufiga kiritilishi ko‘p qatori ustoz Soyib Abdurahmonovich Abdurahmonovning ham zimmasiga ulkan vazifalarni yukladi, chunki mavjud Kon-metallurgiya fakulteti tarkibida 1997-yil 2-iyunda Navoiy davlat konchilik instituti rektorining buyrug‘i bilan “Metallurgiya va foydali qazilmalarni boyitish” kafedrasi tashkil etilishi bilan, S.A. Abdurahmonovning fakultet dekanligi va kafedra dotsentligi vazifalaridagi qizg‘in mehnat faoliyati boshlanib ketdi.

Barcha yangidan tashkil etiladigan ob’ektlarda bo‘lgani kabi, Navoiy davlat konchilik institutini tashkil etilishi og‘ir, mashaqqatli mehnat talab etdi. Ushbu yilda institutni tashkil etilganiga 20 yil to‘lishi arafasida turgan bo‘lsak, o‘tgan davrni ustoz S.A. Abdurahmonovsiz tasavvur qilishga ojizmiz.

2002 yilda professor S.A. Abdurahmonov rahbarligida Kimyometallurgiya fakulteti ish boshladi va yangidan tashkil qilingan “Metallurgiya va foydali qazilmalarni boyitish” kafedrasining istiqbolini belgilash, talabalarga ta’lim berish mas’uliyatini oshirish, mutaxassis kadrlar tayyorlash salmog‘ini kengaytirish, ta’lim bilan ishlab chiqarish integratsiyasini yangi cho‘qqilar-ga olib chiqish borasida ustozning mas’uliyati yana oshdi.

Agar o‘tgan davr mobaynida S.A. Abdurahmonov institutning jonkuyar rahbar xodimlari bilan yelkama-yelka turib, institut ishini tashkil qilish borasida faoliyat olib borgan bo‘lsa, endi yangidan tashkil etilgan fakultetning rahbari sifatida barcha ishlarda bosh-qosh bo‘ldi va talabalarga “Gidrometallurgiya jarayonlari nazariyasi va dastgohlari”, “Nodir metallar metallurgiyasi”, “Rudalarni boyitish” kabi fanlardan bilim berishdan ham charchamadi.

Ustoz Kimyo-metallurgiya fakultetiga rahbarlik qilgan 2002-2004 yillar mobaynida “Metallurgiya va foydali qazilmalarni boyitish” (2002 yil 2 sentyabrdan boshlab “Metallurgiya”) kafedrasini 15 dan ortiq magistratura talabalari va 300 ga yaqin bakalavrlari o‘qishni muvaffaqiyatli tugatib, xalq xo‘jaligining turli sohalarida mehnat faoliyatlarini boshlashdi.

2001 yili Olmaliq kon-metallurgiya kombinatining kon-metallurgiya sohasidagi mutaxassislarga bo‘lgan ehtiyojini qoplash maqsadida Navoiy davlat konchilik institutining Olmaliq kon-metallurgiya fakulteti tashkil etildi. Fakultetda boshqa turdosh kafedralar qatori “Metallurgiya va kimyoviy texnologiya” kafedrasi ham tashkil etilib, ustoz S. Abdurahmonov 2004-2005 o‘quv yilidan 2017-yilgacha ushbu dargohda faoliyat yuritdi.

2017-yildan Toshkent davlat texnika universiteti Olmaliq filiali “Metallurgiya” kafedrasi professori lavozimida ishlab kelmoqda.

Ustoz professor S. Abdurahmonov 60 yillik ilmiy-pedagogik faoliyati davomida yosh olimlar bilan ishlash masalasiga ham alohida etibor qaratdi. Ayniqsa, nafaqat respublikamizda, xorijiy davlatlarda ham o‘z nufuziga ega “O‘zbekiston Respublikasi konchilik xabarnomasi” ilmiy-texnik jurnalining tashkil qilinishiga o‘zining salmoqli hissasini qo‘shdi.

S. Abdurahmonov respublikada birinchilardan bo‘lib foydali qazilmalarni boyitish sohasi bo‘yicha 1997-yilning 19-dekabrida doktorlik dissertatsiyasini himoya qildi. Uning rahbarligida S. Boev, X. Valiev, M.A. Mutalova, D.B. Xoliqulov, N.A. Doniyarov, K. Qurbonov, R. Toshqodirova, R. Alimov, A.A. Qurbonov, F.E. Axtamovlar “Foydali qazilmalarni boyitish» ixtisosligi bo‘yicha nomzodlik dissertatsiyalarini himoya qilishdi.

Professor Soyibjon Abdurahmonovich oliy o‘quv yurti talabalari uchun 5 ta darslik, 12 o‘quv qo‘llanma, 50 dan ortiq o‘quv va uslubiy qo‘llanmalar, 250 ga yaqin ilmiy maqolalar jumladan, 12 ta monografiya, 22 ta mualliflik guvohnomasi va patent muallifidir.

Navoiy davlat konchilik instituti, Toshkent kimyo texnologiya instituti va Olmaota shahridagi “Metallurgiya va boyitish” ilmiy tekshirish institutlari qoshidagi dissertatsiyalarni himoya qilish ixtisoslashgan ilmiy kengashlari a’zosi hamda O‘zbekiston Oliy attestatsiya qo‘mitasining ekspertlar kengashi azosi bo‘lgan. S. Abdurahmonov ish faoliyati davomida halol, fidokorona, tashabbuskorlik bilan qilgan mehnatlari uchun 1997-yilda “Shuhrat” medali, 2022-yilda “Do‘stlik” ordeni, “Konchilik shuhrati” belgisi hamda faxriy yorliqlar bilan mukofotlangan.

Keyingi yillarda ustoz metallurgiya sanoati chiqindilarini qayta ishlash muammolari bilan mashg‘ul. Alqissa, olim, mavqei baland, hurmati cheksiz, bag‘ri va nufuzi keng inson S. Abdurahmonovday ustozning shogirdi bo‘lish bizga nasib qilganidan minnatdormiz. Ularga Allohdan berilgan aql-idrok inomlaridan bizga – shogirdlarga xam nasib qilishini orzu qilgan xolda ustozga uzoq umr, sog‘liqsalomatlik va baxtli keksalikni tilab qolamiz.

O‘zbekiston Respublikasi tog‘-kon sanoati va geologiya vazirligi,
“Navoi kon-metallurgiya kombinati” AJ,
“Olmaliq kon-metallurgiya kombinati” AJ,
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti,
Olmaliq davlat texnika instituti,
“O‘zbekiston konchilik xabarnomasi” jurnalining Tahririyati Kengashi.

РАИМЖАНОВ БАХАДИРЖАН РАИМЖАНОВИЧ

Раимжанов Бахадиржан Раимжанович родился 10 марта 1950 года в г. Узген Ошской области Республики Киргизстан в семье рабочего.

В 1971 году с отличием окончил горно-металлургический факультет Ташкентского политехнического института по специальности «Технология и комплексная механизация подземной разработки месторождений полезных ископаемых» и был оставлен при кафедре стажёром-исследователем.

В период 1972-1975 гг. обучался в целевой аспирантуре Московского горного института, где в 1976 году успешно защитил кандидатскую диссертацию. После этого продолжил свою научно-педагогическую деятельность в Ташкентском политехническом институте, пройдя путь от ассистента до доцента.

В 1988-1991 гг. Б. Раимжанов обучался в очной докторантуре при Московском горном институте, где подготовил докторскую диссертацию, успешно защищённую в 1992 году. В 1994 году ему было присвоено учёное звание профессора.

1991-1994 гг. Б. Раимжанов работал доцентом кафедры, заместителем декана, деканом горно-металлургического факультета, заместителем проректора горно-геологического центра, профессором и заведующим кафедрой «Технология и комплексная механизация подземной разработки месторождений полезных ископаемых» Ташкентского государственного технического университета. С 1995 года он возглавлял Навоийский филиал Ташкентского государственного технического университета. В том же году, при его активном участии, на базе этого филиала был создан Навоийский государственный горный институт, первым ректором которого он являлся на протяжении 10 лет.

Поддержанная руководством республики и целым рядом крупных предприятий его настойчивость и целеустремленность позволили в кратчайшие сроки организовать подготовку специалистов горного профиля в рамках самостоятельного вуза. Под непосредственным руководством Б. Раимжанова была создана учебно-лабораторная и учебно-методическая база, укреплён кадровый состав и заложены основы научного потенциала нового института.

Б. Раимжанов неоднократно бывал в ведущих зарубежных университетах и научных центрах США, Англии, Германии, Голландии, Дании, Южной Кореи, Израиля, Индии и других стран, где изучал мировой опыт ведущих университетов в сфере высшего образования и принимал участие в международных проектах.

С 2006 по 2019 год он работал заместителем главного инженера, а затем заместителем директора по науке ООО «УзГЕОРАНГМЕТЛИТИ». С 2020 года по настоящее время работает профессором кафедры «Горное дело» Филиала НИТУ МИСИС в г. Алмалык. В 1982-1983 учебном году прошёл 10-месячную научную стажировку в Соединенных Штатах Америки. В 1994 году, в ходе научной командировки в Германию, выступал с докладами на международной конференции и научных семинарах. Научная деятельность Б. Раимжанова посвящена актуальным проблемам подземной разработки угольных месторождений. Многие его научные труды относятся к заблаговременной дегазации угольных пластов с целью создания безопасных условий труда в угольных шахтах.

Особое место в научной деятельности Б. Раимжанова занимают проблемы отработки высокогорных месторождений угля в сложных горно-геологических условиях. Разработанные им технологические схемы успешно внедрены на угольных шахтах Центральной Азии. В качестве альтернативы традиционному способу подземной добычи угля Б. Раимжановым предложены нетрадиционные технологические схемы на основе подземной газификации и подземного сжигания угля, которые обеспечивают вовлечение в сферу промышленного производства дополнительных топливно-энергетических ресурсов.

Под его руководством в рамках государственных научно-технических программ, включённых в приоритетные направления социально-экономического развития Республики Узбекистан, проводились научно-исследовательские работы посвященные разработке и внедрению высокоэффективных геотехнологических и биотехнологических способов добычи и переработки руд благородных, цветных и редких металлов, а также по совершенствованию методов разрушения горных пород взрывом.

В настоящее время под его руководством продолжаются научные исследования, которые включены в приоритетные направления социально-экономического развития Республики Узбекистан и посвящены комплексному освоению месторождений полезных ископаемых Республики Узбекистан. Бахадиржан Раимжанович является автором более 300 научных трудов, в том числе восемь монографий, шести учебников и учебных пособий, а так же более десяти изобретений и патентов. Под его научным руководством защищены шесть докторских, четыре кандидатских диссертации и готовятся к защите несколько диссертаций. Как признанный ученый профессор Раимжанов Б. принимает участие в формировании научно-технической политики в области горного дела.

Б. Раимжанов является членом двух Научных советов по защите диссертаций по горным специальностям, членом редколлегии Республиканских журналов «Горный вестник Узбекистана», «Горные машины и технологии», а так же журнала «Горные науки и технологии» (Москва, Россия).

В 2005 году Б. Раимжанов был избран иностранным членом Академии Горных Наук Российской Федерации.

За весомый вклад в развитие высшего образования и горной науки он награждён нагрудным знаком «Ўзбекистон Республикаси олий таълим аълочиси» и почётными грамотами Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан, а также нагрудным знаком «Горняцкая слава» I, II и III степеней.

Друзья, коллеги и ученики сердечно поздравляют Бахадиржана Раимжанова с 75-летним юбилеем и желают ему крепкого здоровья, неиссякаемой жизненной энергии, творческих успехов и новых значимых научных достижений.

Министерство горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан,
АО «Навоийский горно-металлургический комбинат»,
АО «Алмалыкский горно- металлургический комбинат»,
Навоийский государственный горно-технологический университет,
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
НИТУ «МИСиС» (Россия) и Алмалыкский филиал,
ООО «УзГЕОРАНГМЕТЛИТИ»,
АО «Узбекуголь»,
Редакционный Совет журнала «Горный вестник Узбекистана».

NAZAROV ZOIR SODIQOVICH

70

Nazarov Zoir Sodiqovich 1955 yilning 1 aprelida Jizzax viloyati G‘allaorol tumanida tavallud topgan.

Yoshligidan ilm-fanga bo‘lgan qiziqishi va qattiq mehnatga tayyorligi uning kelgusidagi katta yutuqlari uchun mustahkam poydevor bo‘ldi.

1972 yilda u G‘allaorol tumani markazidagi 44-sonli o‘rta maktabni muvaffaqiyatli tamomladi. Keyinchalik, o‘zining qiziqish va maqsadlariga muvofiq, Toshkent politehnika instituti Kon metallurgiya fakultetining “Foydali qazilma konlarini ochiq usulda qazib olish texnologiyasi va kompleks mexanizatsiyasi” mutaxassisligini 1978 yilda tamomlab, o‘z sohasida yuqori malakaga ega bo‘ldi.

Uning mehnat faoliyati 1978 yilda Langar kon boshqarmasida ishlab chiqarish va texnika bo‘limining katta muhandisi sifatida boshlandi. Bu lavozimda u texnik jihatdan murakkab masalalarni hal etishda faol ishtirok etdi va konchilik ishlab chiqarish jarayonlarini yanada samarali qilishga o‘z hissasini qo‘shdi.

1979 yildan 1984 yilgacha esa Marjonbuloq oltin qazib olish kon boshqarmasida konchilik tsexining katta ustasi, bosh muhandisi va boshlig‘i lavozimlarida faoliyat yuritdi.

Bu davr uning boshqaruvchilik va muhandislik qobiliyatlarini yanada oshirdi, murakkab ishlarni samarali tashkil etish hamda jamoani boshqarishdagi tajribasini mustahkamladi.

1984 yildan 1986 yilgacha u O‘zbekiston Respublikasi avtoyol vazirligining № 3 maxsus burg‘ulash portlatish ishlari boshqarmasida prorab sifatida, shuningdek, Jizzax geologiya qidiruv ekspeditsiyasida texnika xavfsizligi va mehnatni muhofaza qilish bo‘yicha bosh muhandis o‘rinbosari sifatida faoliyat ko‘rsatdi.

Bu lavozimlar unga sanoat xavfsizligi, mehnatni muhofaza qilish va zamonaviy texnologiyalarni joriy etishda katta tajriba berdi.

1986-1989 yillarda u A.A. Skochinskiy nomidagi Moskva akademik institutida aspiranturani muvaffaqiyatli tamomlab, “Portlatish ishlarning samaradorligini oshirish uchun oddiy portlovchi moddalardan faol zaboykani ishlab chiqish” mavzusida nomzodlik dissertatsiyasini yoqladi. Ushbu ilmiy ish konchilik sohasida portlatish texnologiyasini takomillashtirishga qaratilgan bo‘lib, uning amaliy ahamiyati katta bo‘ldi.

1989 yildan 1999 yilgacha Marjonbuloq oltin qazib olish kon boshqarmasi karyerining bosh muhandisi, ishlab chiqarish va texnika bo‘limi boshlig‘i, “Tanga” kar’yeri boshlig‘i hamda kon boshqarmasi umumiy masalalar bo‘yicha direktor o‘rinbosari lavozimlarida faoliyat yuritdi.

Bu davrda u ko‘plab yangi texnologiyalarni joriy etish, ishlab chiqarishni samaradorligini oshirish va xavfsizlikni ta’minlash sohasida katta natijalarga erishdi.

1999-2009 yillarda Navoiy davlat konchilik instituti “Konchilik ishi” kafedrasida katta o‘qituvchi va dotsent sifatida faoliyat ko‘rsatdi. 2005 yilda unga dotsent unvoni berildi.

Ushbu yillarda u ko‘plab talabalarni ilm-fanga yo‘naltirdi, ularning kasbiy rivojlanishiga katta hissa qo‘shdi.

2009-2015 yillarda “Navoiy kon-metallurgiya kombinati” davlat korxonasi ilmiy-tadqiqot laboratoriyasi konchilik byurosi yetakchi muhandisi va boshlig‘i sifatida ishlab, ishlab chiqarish jarayonlarini takomillashtirish va innovatsion texnologiyalarni joriy etishga katta e’tibor qaratdi.

2015 yildan hozirgi kungacha Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti “Konchilik fakulteti” Konchilik ishi kafedrasida dotsentlik lavozimida faoliyat yuritmoqda.

U o‘zining ilmiy-tadqiqot ishlari va pedagogik faoliyati orqali yosh mutaxassislarni tayyorlashda katta hissa qo‘shmoqda.

Z.S. Nazarovning ilmiy tadqiqotlari “Ochiq va yer osti kon ishlari samaradorligini oshirish va xavfsizligini ta’minlash” yo‘nalishida olib borilmoqda. Uning ilmiy izlanishlari 50 dan ortiq ilmiy maqolalar, 1 monografiya, 3 o‘quv qo‘llanma, 8 ta o‘quv-uslubiy qo‘llanma hamda 4 ta patentda namoyon bo‘lgan. Bu uning ilm-fanga qo‘shgan ulkan hissasini ko‘rsatadi.

Nazarov Z.S. pedagogik faoliyatga doimo ijodiy yondashadi. Konchilik ishining “Burg‘ilash portlatish”, “Konchilik ishlarida xavfsizlik qoidalari”, “Kon resurslaridan oqilona foydalanish va muhofazalashning ilmiy asoslari”, “Sanoat chiqindilarini boshqarish, resurslarni tiklash va qayta ishlash texnologiyasi” va “Kar’yerni loyihalash va bort turg‘unligini ta’minlash” kabi muhim kurslardan talabalar uchun tajriba ishlari, kurs loyihalari va sirtqi bo‘lim talabalariga mo‘ljallangan tayanch iboralarga asoslangan o‘quv-uslubiy qo‘llanmalarni yaratdi. Ularning barchasi yuqori sifatda yozilib, ilmiy jamoatchilik va talabalar orasida katta e’tirofga sazovor bo‘lgan.

Universitetda Zoir Sodiqovichning nafaqat pedagogik balki ilmiy-pedagogik faoliyati ham yuqori baholanadi.

Nazarov Z.S. 4 ta falsafa doktori (PhD) ishlariga, 15 dan ortiq magistrlik dissertatsiyalariga rahbarlik qilgan, har bir shogirdi yuqori darajada muvaffaqiyat bilan ilmiy ishlarini himoya qilgan.

Hozirgi kunda uning rahbarligida 3 ta doktorant va 2 ta magistr o‘z ilmiy tadqiqotlarini olib bormoqda.

“Konchilik ishi” yo‘nalishini tugatgan bitiruvchilar O‘zbekistonning barcha mintaqalarida turli vazifalarda faoliyat yuritmoqda. Jumladan, ular universitetimizda professor va dotsent, ishlab chiqarish sohasida esa Navoiy kon-metallurgiya kombinati korxonalarida yetakchi mutaxassis sifatida ishlamoqda. Nazarov Z.S. 10 dan ortiq yirik ilmiy loyihalarda mas’ul sifatida rahbarlik qilgan.

Uning xizmatlari munosib e’tirof etilgan: Navoiy viloyati hokimligi, Navoiy kon-metallurgiya kombinati korxonasi va universitet rektori tomonidan “Maqtov yorliqlari” bilan taqdirlangan.

Shuningdek, Navoiy kon-metallurgiya kombinati davlat korxonasi tomonidan “Konchilik shuxrati” ko‘krak nishonining 1 va 2 darajali mukofotlariga sazovor bo‘lgan.

Z.S. Nazarov universitetdagi faoliyati davomida mohir pedagog, yuqori malakali mutaxassis va mehribon hamkasb sifatida tanilgan. U o‘z hamkasblari va talabalar orasida jonkuyarligi, tashabbuskorligi va ma’naviy yetukligi bilan ajralib turadi.

Universitet jamoasida u alohida hurmatga sazovor, talabalarining hurmatli ustozidir.

“Navoi kon-metallurgiya kombinati” AJ,
“Olmaliq kon-metallurgiya kombinati” AJ,
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti,
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti,
Olmaliq shahridagi “Milliy texnologik tadqiqotlar universiteti “MISiS” filiali,
“O‘zGEORANGMETLIT” MChJ,
“O‘zbekiston konchilik xabarnomasi” jurnalining Tahririyati Kengashi.

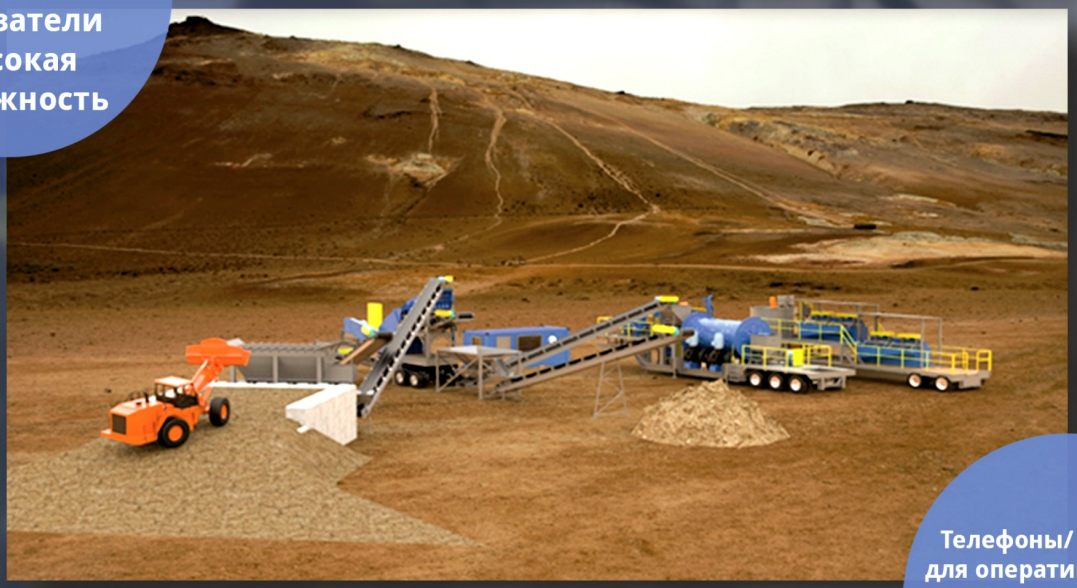
INTERTECH Process Technology Ore to Gold

3 Commerce Drive, Suite 304
Atkinson, New Hampshire 03811 USA

Tel.: 603.893.9566
Fax: 603.893.9279
Email: info@intertechprocess.com
Site: www.intertechprocess.com

МОДУЛЬНЫЕ ФАБРИКИ «SEPRO»

Оптимальная конфигурация
Стабильные показатели
Высокая надёжность



Телефоны/ WhatsApp для оперативной связи:
Узб. +998 91 162 1404
США +1 603 275 2000
СНГ +7 926 224 02 04

Инжиниринг
Проектирование
Изготовление
Поставка
Шеф-монтаж
Запуск

Epiroc

«Навесные гидравлические молоты Epiroc для карьерных работ. Производительность в самых тяжелых условиях эксплуатации»