Код МРНТИ 52.13.25

С. С. Шерубаев[1], Р. К. Жанакова[2], Ж. Б. Тошов[4], *М. А. Сарыбаев[3]
[1]КарТУ им. А. Сагинова (г. Караганда, Казахстан),
[2]КазНИТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан),
[3]КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан),
[4]ТГТУ им. И. Каримова (г. Ташкент, Узбекистан)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕЛИКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ НАКЛОННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) междукамерных целиков (МКЦ) в зависимости от технологических параметров очистной выемки наклонных залежей Жезказганского месторождения с углами падения 20–35°. Оценка НДС выполнена методом граничных элементов (ПО EXAMINE 2D) в пространственной постановке и сближенных залежей при мощности МКЦ 4, 8 и 12 м и мощности междупластья 5 и 10 м. Установлено, что определяющее влияние на НДС МКЦ оказывает мощность залежи, тогда как угол ее падения существенного влияния не оказывает. Показано, что при мощности междупластья 5 м несущая способность породного перекрытия недостаточна, тогда как при 10 м и более обеспечивается более чем двукратный запас прочности.
Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, устойчивость, камерно-столбовая система, целики, наклонные залежи.*

Көлбеу қабаттарын өндіру кезіндегі кентіректердің кернеулі-деформацияланған күйінің өзгеру заңдылықтары

Аңдатпа. Мақалада Жезқазған кен орнының 20–35° құлау бұрышы бар көлбеу қабаттарын өндіру технологиялық параметрлеріне байланысты кентіректердің (МКЦ) кернеулі-деформацияланған күйінің (КДК) өзгеру заңдылықтарын зерттеу нәтижелері келтірілген. КДК бағалауы (EXAMINE 2D) бағдарламалық кешенімен (шекаралық элементтер әдісі, кеңістіктік қойылым) және жалғыз және жақындасқан қабаттар үшін, кентіректің биіктігі 4, 8 және 12 м, аралық қабат қалыңдығы 5 және 10 м болғанда орындалды. Кентіректердің КДК-на негізгі әсерді қабат қалыңдығы тигізетіні, ал құлау бұрышының елеулі әсері жоқ екені анықталды. Аралық қабат қалыңдығы 5 м болғанда жабын жыныстарының көтергіш қабілеті жеткіліксіз, ал 10 м және одан жоғары болғанда беріктік қоры екі есеге дейін артатыны көрсетілді.
Түйінді сөздер: *кернеулі-деформацияланған күй, орнықтылық, камералы-бағаналы өндіру жүйесі, кентіректер, көлбеу қабаттар.*

Patterns of stress-strain state variation in pillars during the mining of inclined ore bodies

Abstract. The paper presents the results of a study of stress-strain state (SSS) variation patterns in inter-chamber pillars during the mining of inclined ore bodies at the Zhezkazgan deposit at dip angles of 20–35°. The stress-strain state (SSS) was assessed using the boundary element method (EXAMINE 2D software) in a three-dimensional formulation for closely spaced ore bodies, with inter-chamber pillar thicknesses of 4, 8, and 12 m and interlayer thicknesses of 5 and 10 m. It was established that pillar SSS is governed primarily by the ore body thickness, while the dip angle has no significant effect. It is shown that at an interlayer thickness of 5 m the bearing capacity of the rock roof is insufficient, whereas at 10 m or more a safety factor of more than two is provided.
Keywords: *stress-strain state, stability, room-and-pillar mining system, pillars, inclined ore bodies.*

Введение

На рудниках ТОО «Корпорация Казахмыс» широко применяется панельно-столбовая система разработки с использованием самоходного оборудования. Высота отработки ограничена 12 м из условий безопасности осмотра кровли. Особую сложность представляет отработка залежей с углами падения от 20° до 35°. При таких углах параметры системы, рассчитанные для пологих залежей, требуют корректировки из-за изменения характера распределения напряжений и возрастания асимметрии нагружения граней целиков.

Целью работы является установление закономерностей изменения НДС целиков и определение их рациональных параметров, формы и расположения при подземной отработке наклонных (более 20°) и перекрывающихся залежей Жезказганского месторождения. В качестве оптимальной системы, согласно методике О. А. Байконурова, выбрана камерно-столбовая.

Материалы и методы исследования

Жезказганское месторождение относится к типу медистых песчаников с общей мощностью рудоносной толщи около 600 м (выделяется 10 рудных горизонтов и более 360 рудных тел). Непосредственная кровля и почва сложены красноцветными породами, алевролитами и аргиллитами. Физико-механические свойства руд и вмещающих пород, учтенные в расчетах, приведены в таблице 1.

Определение НДС междукамерных целиков (МКЦ) проводилось с заданными параметрами: объемный вес пород γ = 2,6 т/м³, коэффициент Пуассона μ = 0,22, модули упругости $E_п$ = 44 000 МПа (породы) и $E_р$ = 48 000 МПа (руда). Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ = 120 МПа, на растяжение $\sigma_{раст}$ = 8,8 МПа.

Для моделирования использовался метод граничных элементов (МГЭ) в программном комплексе Examine2D для анализа напряженно-деформированного состояния массива горных пород и целиков.

Результаты исследования

Расчеты НДС для одиночной залежи (МКЦ 5 × 5 м) при углах падения 20–35° и мощности МКЦ 4, 8 и 12 м представлены на рис. 1. Установлено, что при увеличении высоты МКЦ с 4 до 12 м полные сжимающие напряжения закономерно снижаются со 127–135 МПа до 99–106 МПа, а показатель устойчивости растет. Максимальные растягивающие напряжения достигают 2,5 МПа. Изменение угла падения залежи в исследуемом диапазоне приводит к изменению напряжений лишь в пределах 5–8 МПа. При росте высоты целика ширина его упругого ядра сокращается с 30% до 10–15%.

Результаты моделирования соосно расположенных залежей на глубинах 500–600 м (рис. 2) показали, что при мощности междупластья 5 м растягивающие напряжения в породном перекрытии достигают 7,5 МПа. При увели-

Таблица 1

Физико-механические свойства руд и вмещающих пород Жезказганского месторождения

Кесте 1

Жезқазған кен орнының кендері мен сыйымды жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттері

Table 1

Physical and mechanical properties of ores and host rocks of the Zhezkazgan deposit

Порода	σ_c, МПа	σ_p, МПа	c, МПа	φ, град	E, ГПа	ν
Руда медная	140–230	10–18	25–30	35	32–45	0,20–0,22
Руда медно-цинковая	160–240	10–18	30–34	35	50–65	0,18–0,21
Песчаник серый безрудный	160–245	8–11	25–34	35	45–65	0,18–0,22
Песчаник красный	80–120	2–4	20–25	30	39–42	0,20–0,22
Алевролит красный	30–60	2–4	18–20	30	32–40	0,22–0,25

(σ_c — предел прочности при одноосном сжатии, σ_p — при растяжении, c — сцепление, φ — угол внутреннего трения, E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона)

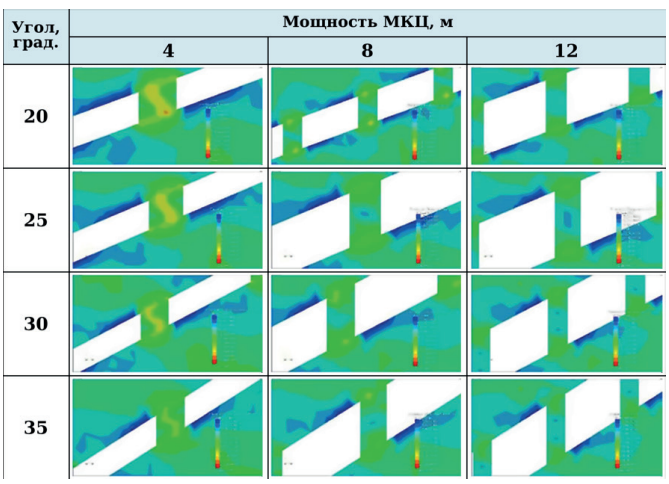


Рис. 1. Закономерности распределения первого главного напряжения в МКЦ в зависимости от мощности и угла падения залежи.
Сурет 1. Кен орнының қуаты мен түсу бұрышына байланысты МКЦ-дегі бірінші негізгі кернеудің таралу заңдылықтары.
Figure 1. Patterns of distribution of the first main voltage in the MCC depending on the power and angle of incidence of the deposit.

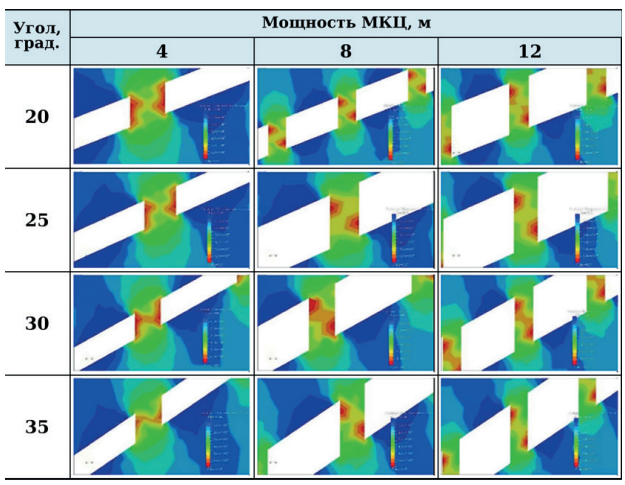


Рис. 2. Закономерности распределения третьего главного напряжения (максимального сжимающего напряжения) в МКЦ в зависимости от мощности и угла падения залежи.
Сурет 2. Кен орнының қуаты мен түсу бұрышына байланысты МКЦ-де үшінші негізгі кернеудің (максималды қысу кернеуінің) таралу заңдылықтары.
Figure 2. Patterns of distribution of the third main voltage (maximum compressive stress) in the MCC depending on the power and angle of incidence of the deposit.

чении мощности междупластья до 10 м максимальные растягивающие напряжения снижаются до 2,5–5,0 МПа.

Анализ деформаций массива зафиксировал значения, не превышающие $0{,}3 \cdot 10^{-3}$ на растяжение и $-1{,}4 \cdot 10^{-3}$ на сжатие; ожидаемая осадка составляет не более 0,2% высоты МКЦ. Моделирование изменения геометрии целиков показало, что выполаживание нижней части ножки МКЦ по направлению падения залежи снижает максимальные растягивающие напряжения до 2,5 МПа, а сжимающие напряжения в ядре целика на 5–10 МПа.

Обсуждение результатов

Полученные данные доказывают, что определяющим фактором НДС целиков является мощность залежи (высота МКЦ). Влияние угла падения в диапазоне 20–35° носит сугубо второстепенный характер и не требует принципиального изменения расчетных схем. Возникающие растягивающие напряжения (2,5 МПа) обеспечивают надежный запас прочности (2,0–2,5 раза). Однако выявленное сужение упругого ядра у высоких (до 12 м) столбчатых целиков свидетельствует об исчерпании их резерва несущей способности, что диктует необходимость строгого ограничения их высоты.

Сравнение вариантов междупластья выявило критический порог устойчивости. Значение напряжений 7,5 МПа при 5-метровом междупластье находится на нижней границе предела прочности пород на растяжение (5–10 МПа). Это означает, что перекрытие в таких условиях потенциально неустойчиво. Переход к 10-метровому междупластью снижает напряжения до безопасного уровня, обеспе-

чивая двукратный запас прочности. Таким образом, мощность целика-разделителя выступает самостоятельным лимитирующим параметром, недостаток которого нельзя компенсировать изменением размеров самих МКЦ.

Уровень зафиксированных деформаций однозначно указывает на то, что целики и вмещающие породы работают в упругом, обратимом режиме, что подтверждает корректность выбранных расчетных моделей. Эффективность выполаживания ножки МКЦ физически объясняется снятием локальной концентрации растягивающих усилий, которая возникает из-за асимметричного нагружения граней на наклонных залежах. Это инженерное решение позволяет повысить равномерность передачи нагрузки и общую несущую способность целиков без эксплуатационных потерь руды на увеличение их габаритов.

Заключение

Для одиночных залежей мощностью 4–12 м устойчивость целиков достаточна: растягивающие напряжения ≤ 2,5 МПа (запас 2,0–2,5), сжимающие 65–70 МПа. Из-за сужения упругого ядра до 10–15% при росте мощности требуется ограничение высоты столбчатых целиков. Для сближенных залежей лимитирующим фактором является мощность междупластья: при 5 м запас прочности исчерпан (напряжения до 7,5 МПа), при 10 м обеспечивается безопасность (2,5–5,0 МПа). Минимальная мощность породного перекрытия должна быть не менее 10 м.

Деформации массива не превышают $0{,}3 \cdot 10^{-3}$ на растяжение и $-1{,}4 \cdot 10^{-3}$ на сжатие, что подтверждает работу целиков в обратимом упругом режиме. Выполаживание ножки МКЦ по падению снижает максимальные напряжения в ядре на 5–10 МПа и устраняет локальную концентрацию растягивающих усилий без изменения базовых параметров системы разработки. Выявленные рациональные параметры целиков и междупластья, а также рекомендации по форме МКЦ целесообразно использовать при проектировании очистной выемки (например, на шахте Анненская), с перспективой дальнейших исследований для больших глубин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Kumar M., Avchar A., Sinha S. Гибридная эмпирико-численная методика оценки устойчивости и крепления целиков в глубоких подземных рудниках // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2026. – Т. 60 (1). – С. 115–128 (на английском языке)*
2. *Zhang Q., Liu Z., Chen Y. Численное моделирование повреждения массива горных пород и изменения напряжений методом FLAC3D-IMASS при выемке неукрепленных остаточных целиков в глубокозалегающих месторождениях твёрдых пород // Geotechnics. – 2025. – Т. 5 (4). – С. 1–18 (на английском языке)*
3. *Постепенное разрушение целиков и управление креплением на основе данных мониторинга при камерно-целиковом способе разработки месторождений крепких пород: на примере рудника Unki / M. K. Shayanowako [и др.] // Rock Mechanics Letters. – 2025. – Т. 2 (4). – Ст. 100032 (на английском языке)*
4. *Новый подход к выбору рациональных крепей для подземных горных выработок / T. Almenov [и др.] // Civil Engineering Journal. – 2025. – Т. 11 (3). – Ст. 22 (на английском языке)*
5. *Каркасное моделирование для оптимизации параметров открытого карьера вольфрамового месторождения Бугуты / R. Zhanakova [и др.] // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2026. – № 4. – С. 28–36 (на английском языке)*
6. *Исследование методов извлечения целиков, основанных на ленточной закладке и вторичной выемке полезных ископаемых / Hao Jian [и др.] // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Т. 10. – Ст. 1051245 (на английском языке)*
7. *Обоснование параметров междукамерного целика при разработке наклонных залежей / Д. Т. Ивадилинова [и др.] // Горный журнал Казахстана. – 2024. – № 11. – С. 27–33 (на русском языке)*
8. *Моделирование геомеханических процессов при переходе от открытой к подземной разработке месторождений сложной морфологии / D. Bekbergenov [и др.] // Civil Engineering Journal. – 2025. – Т. 11. – № 7. – С. 2862–2888 (на английском языке)*
9. *Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В. Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений // Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 49–52 (на русском языке)*
10. *Сценарная экономическая оценка и локальное ранжирование вариантов разработки рудного тела в зонах обрушения Жезказганского месторождения / D. Bekbergenov [и др.] // Sci (MDPI). – 2026. – Т. 8. – № 9. – Ст. 242 (на английском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Kumar M., Avchar A., Sinha S. Терең жерасты кеніштеріндегі целиктердің орнықтылығы мен бекітпесін негіздеудің эмпирикалық-сандық гибридтік әдістемесі // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2026. – Т. 60 (1). – Б. 115–128 (ағылшын тілінде)*
2. *Zhang Q., Liu Z., Chen Y. Терең жатқан қатты жынысты кен орындарындағы бекітпесіз қалдық целиктерді алу кезінде тау жыныстары массивінің бұзылуы мен кернеулердің өзгеруін FLAC3D-IMASS арқылы сандық модельдеу // Geotechnics. – 2025. – Т. 5 (4). – Б. 1–18 (ағылшын тілінде)*
3. *Қатты жынысты камералық-бағандық кен өндіру кезінде целиктердің біртіндеп бұзылуы және мониторинг нәтижелеріне негізделген бекітуді басқару: Unki кенішінің мысалында / M. K. Shayanowako [және т. б.] // Rock Mechanics Letters. – 2025. – Т. 2 (4). – 100032 (ағылшын тілінде)*
4. *Жерасты тау-кен қазбалары үшін ұтымды бекітпелерді таңдаудың жаңа тәсілі / T. Almenov [және т. б.] // Civil Engineering Journal. – 2025. – Т. 11 (3). – 22 (ағылшын тілінде)*

5. *Бұғыты вольфрам кен орнының ашық кеніш параметрлерін оңтайландыру үшін каркастық модельдеу / R. Zhanakova [және т. б.] // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2026. – № 4. – Б. 28–36 (ағылшын тілінде)*
6. *Таспалы толтырмалауға және пайдалы қазбаларды қайталама өндіру әдістеріне негізделген целиктерді алу әдістерін зерттеу / Hao Jian [және т. б.] // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Т. 10. – 1051245 (ағылшын тілінде)*
7. *Көлбеу кен денелерін игеру кезінде камерааралық целик параметрлерін негіздеу / Д. Т. Ивадилинова [және т. б.] // Қазақстанның тау-кен журналы. – 2024. – № 11. – Б. 27–33 (орыс тілінде)*
8. *Күрделі морфология жағдайында ашық тау-кен жұмыстарынан жерасты тау-кен жұмыстарына өту кезіндегі геомеханикалық процестерді модельдеу / D. Bekbergenov [және т. б.] // Civil Engineering Journal. – 2025. – Т. 11. – № 7. – Б. 2862–2888 (орыс тілінде)*
9. *Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В. Кен орындарын игеру жобаларын іске асыру кезінде табиғи-техногендік жүйелердің геодинамикалық жағдайын бағалау әдістемесі // Тау-кен журналы. – 2020. – № 1. – Б. 49–52 (орыс тілінде)*
10. *Жезқазған кен орнының опырылу аймақтарындағы кен денесін игеру нұсқаларын сценарийлік экономикалық бағалау және жергілікті ранжирлеу / D. Bekbergenov [және т. б.] // Sci (MDPI). – 2026. – Т. 8. – № 9. – 242 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *A hybrid empirical-numerical framework for pillar stability and reinforcement in deep underground mines / M. Kumar et al. // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2025. – Vol. 60 (1). – P. 115–128 (in English)*
2. *FLAC3D-IMASS numerical modelling of rock mass damage and stress evolution during unsupported remnant pillar extraction in deep hard-rock ore deposits / Q. Zhang et al. // Geotechnics. – 2025. – Vol. 5 (4). – P. 1–18 (in English)*
3. *Progressive pillar degradation and monitoring-driven reinforcement control in hard-rock room-and-pillar mining: Using Unki Mine as a case study / M. K. Shayanowako et al. // Rock Mechanics Letters. – 2025. – Vol. 2 (4). – Article 100032 (in English)*
4. *A novel approach to selecting rational supports for underground mining workings / T. Almenov et al. // Civil Engineering Journal. – Vol. 11 (3). – Article 22 (in English)*
5. *Wireframe modeling to optimize open-pit parameters of the Boguty tungsten deposit / R. Zhanakova et al. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2026. – No. 4. – P. 28–36 (in English)*
6. *A case study of pillar extraction methods based on strip backfilling and secondary mining methods / J. Hao et al. // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Vol. 10. – Article 1051245 (in English)*
7. *Obosnovanie parametrov mezhdukamernogo tselika pri razrabotke naklonnykh zalezhei [Justification of inter-chamber pillar parameters in the development of inclined deposits] D. T. Ivadilinova et al. Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. – 2024. – No. 11. – P. 27–33 (in Russian)*
8. *Modeling of geomechanical processes from open-pit to underground mining with complex morphology / D. Bekbergenov et al. // Civil Engineering Journal. – 2025. – Vol. 11. – No. 7. – P. 2862–2888 (in Russian)*
9. *Sidorov D. V., Ponomarenko T. V. Metodologiya otsenki geodinamicheskogo sostoyaniya prirodno-tekhnogennykh sistem pri realizatsii proektov osvoeniya mestorozhdenii [Methodology for assessing the geodynamic state of natural-technogenic systems during the implementation of mineral deposit development projects]. Gornyi zhurnal [Mining Journal]. – 2020. – No. 1. – P. 49–52 (in Russian)*
10. *Scenario-based economic assessment and local ranking of orebody mining alternatives in caving zones of the Zhezkazgan deposit / D. Bekbergenov et al. // Sci (MDPI). – 2026. – Vol. 8. – No. 9. – Article 242 (in English)*

Сведения об авторах:
Шерубаев С. С., докторант, Карагандинский технический университет им. А. Сагинова (г. Караганда, Казахстан), *sherubaev.sanzhar@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0003-9176-3096
Жанакова Р. К., КазНИТУ им. К. И. Сатпаева, доктор Ph.D (г. Алматы, Казахстан), *zhanakova_raisa@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-0845-8449
Тошов Ж. Б., д. т. н., профессор, ТГТУ им. И. Каримова (г. Ташкент, Узбекистан), *javokhir.toshov@yandex.ru;* https://orcid.org/0000-0003-4278-1557
Сарыбаев М. А., к. т. н., КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан), *sarybaev.m@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-4488-5659

Авторлар туралы мәліметтер:
Шерубаев С. С., докторант, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті (Қарағанды қ., Қазақстан)
Жанакова Р. Қ., Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Ph.D докторы (Алматы қ., Қазақстан)
Тошов Ж. Б., т. ғ. д., профессор, И. Каримов атындағы Ташкент мемлекеттік техникалық университеті (Ташкент қ., Өзбекстан)
Сарыбаев М. А., т. ғ. к., аль-Фараби атындағы КазҰУ (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Sherubayev S. S., doctoral student, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)
Zhanakova R. K., Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev Ph.D, Associate Professor (Almaty, Kazakhstan)
Toshov J. B., c. t. s., professor, TSTU named after Islam Karimov (Tashkent, Uzbekistan)
Sarybayev M. A., c. t. s., KazNU named after al-Farabi (Almaty, Kazakhstan)