

Код МРНТИ 52.13.23:52.13.25

М.А. Байкенжин¹, *Ж.Б. Рашид¹, Ш.А. Очилов²¹НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан),²Университет геологических наук (г. Ташкент, Узбекистан)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕССТОЕЧНОЙ КРЕПИ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОКРУЖАЮЩИМ МАССИВОМ ПОРОД

Аннотация. В статье представлено физическое моделирование бесстоечной шарнирной крепи, предназначенной для поддержания подготовительных горных выработок. Основная цель данного исследования – экспериментально подтвердить результаты ранее выполненного численного анализа напряженно-деформированного состояния конструкции и тем самым доказать достоверность и эффективность шарнирной схемы по сравнению с традиционной прямолинейной балкой. Моделирование проводилось с использованием программного комплекса Ansys Mechanical и гидравлического пресса GCTS PLT-2W. Полученные данные показали, что шарнирная крепь обеспечивает более равномерное распределение нагрузок, повышает несущую способность и снижает давление на боковые стенки выработки, что подтверждает ее практическую эффективность в реальных горных условиях.

Ключевые слова: бесстоечная крепь, шарнирная конструкция, подготовительные выработки, физическое моделирование, численное моделирование, GCTS PLT-2W, напряженно-деформированное состояние, распределение нагрузок, устойчивость выработки.

Қоршаған тау жыныстары массивімен өзара әрекеттесетін тірексіз бекітпенің физикалық модельдеуі

Аннотация. Мақалада дайындық тау-кен қазбаларын бекітуге арналған тірексіз шарнирлі крептің физикалық модельдеуі ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты – конструкцияның кернеулі-деформацияланған күйінің бұрын орындалған сандық талдау нәтижелерін эксперименттік түрде растау және шарнирлі сұлбаның дәстүрлі түзу арқалықпен салыстырғандағы сенімділігі мен тиімділігін дәлелдеу. Модельдеу Ansys Mechanical бағдарламалық кешені мен GCTS PLT-2W гидравликалық пресі қолдану арқылы жүргізілді. Алынған нәтижелер шарнирлі крепь жүктемелердің біркелкі таралуын қамтамасыз ететінін, көтергіш қабілетін арттыратынын және қазбаның бүйір қабырғаларына түсетін қысымды төмендететінін көрсетті, бұл оның нақты тау-кен жағдайларындағы практикалық тиімділігін дәлелдейді.

Түпінді сөздер: тірексіз бекітпе, шарнирлі конструкция, дайындық қазбалары, физикалық модельдеу, сандық модельдеу, GCTS PLT-2W, кернеулі-деформацияланған күй, жүктемелердің таралуы, қазбаның тұрақтылығы.

Physical modeling of strutless support interacting with the surrounding rock mass

Abstract. The paper presents physical modeling of a strutless hinged support designed for maintaining development mine workings. The main objective of the study is to experimentally confirm the results of a previously performed numerical analysis of the stress-strain state of the structure and thereby demonstrate the reliability and efficiency of the hinged scheme compared to a traditional straight beam. The modeling was carried out using the Ansys Mechanical software package and a GCTS PLT-2W hydraulic press. The obtained results show that the hinged support provides a more uniform load distribution, increases load-bearing capacity, and reduces pressure on the sidewalls of the working, confirming its practical effectiveness under real mining conditions.

Key words: strutless support, hinged structure, development workings, physical modeling, numerical modeling, GCTS PLT-2W, stress-strain state, load distribution, working stability.

Введение

Одной из актуальных задач современного горного дела является обеспечение устойчивости подготовительных выработок при сложных горно-геологических условиях. От надежности и эффективности работы крепи зависит безопасность ведения горных работ и долговечность эксплуатации выработок. Традиционные конструкции, выполненные в виде цельной прямолинейной балки, нередко оказываются недостаточно устойчивыми при воздействии переменных нагрузок, что приводит к деформациям и дополнительным напряжениям в боковых частях выработки [1–2].

Применение численного и физического моделирования позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние элементов крепи и выявлять закономерности их взаимодействия с окружающим массивом пород [3]. Использование таких инструментов, как Ansys Mechanical, обеспечивает возможность точного расчета распределения нагрузок, а физические эксперименты позволяют подтвердить достоверность полученных расчетных данных [4–6].

Проблема исследования заключается в необходимости экспериментального подтверждения численных расчетов и сравнительной оценки различных конструктивных схем бесстоечной крепи. Недостаточная изученность совместной работы элементов шарнирной системы и массива пород в условиях реальных нагрузок требует дополнительного анализа и проверки [7].

Целью исследования является подтверждение результатов численного анализа напряженно-деформированного

состояния бесстоечной шарнирной крепи и доказательство ее преимуществ перед традиционной прямолинейной балочной конструкцией.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- проведение физического моделирования работы бесстоечной шарнирной крепи с использованием гидравлического пресса GCTS PLT-2W;
- сопоставление результатов физических испытаний с данными численного моделирования, выполненного в Ansys Mechanical;
- анализ различия в напряженно-деформированном состоянии для шарнирной и прямолинейной схем крепи;
- определение конструктивных особенностей, обеспечивающих повышение несущей способности и снижение давления на боковые стенки выработки.

Методология исследования

Для обоснования эффективности предлагаемой конструкции были проведены численные исследования с использованием программного комплекса Ansys Mechanical, а также физическое моделирование на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W. В рамках численного моделирования были рассмотрены следующие варианты конструкции крепи:

- верхняя выработка в виде прямой балки;
- верхняя выработка, разделенный на две части шарниром, с различными углами наклона составных частей балки (20°, 25°, 30°, 35°).

Основной целью численного моделирования было выявление оптимального угла наклона для минимизации напряжений в конструкции [8].

Методология исследования основана на комплексном применении численного и физического моделирования, что позволило всесторонне оценить работу бесстоечной крепи и ее взаимодействие с окружающим массивом пород. На первом этапе было выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции с использованием программного комплекса Ansys Mechanical. В расчетной постановке учитывались геометрические и прочностные характеристики элементов крепи, а также граничные условия, моделирующие опирание крепи на боковые стенки выработки и воздействие горного давления.

В ходе численного моделирования были рассмотрены два основных конструктивных решения: верхняк в виде цельной прямолинейной балки и верхняк, разделенный на две части шарнирным соединением. Для шарнирной схемы анализировались различные углы наклона составных элементов, равные 20°, 25°, 30° и 35°, с целью определения оптимальной геометрии конструкции. Основным критерием оценки являлись величины и характер распределения эквивалентных напряжений, а также деформации в наиболее нагруженных зонах крепи.

На втором этапе исследования было проведено физическое моделирование работы крепи на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W. Для этого были изготовлены физические модели верхняка в виде прямой балки и шарнирной балки с углом наклона, выбранным по результатам численного анализа. Нагружение осуществлялось поэтапно до достижения предельного состояния, при этом регистрировались зависимости нагрузки от перемещения и фиксировались значения максимальной воспринимаемой нагрузки.

Заключительным этапом методологии стало сопоставление результатов численного и физического моделирования. Сравнительный анализ позволил оценить степень соответствия расчетных и экспериментальных данных, подтвердить достоверность численных моделей и выявить конструктивные преимущества бесстоечной шарнирной крепи по сравнению с традиционной прямолинейной балочной схемой [9–10].

Результаты и обсуждения

В результате выполненного численного моделирования установлено, что конструктивная схема бесстоечной крепи с шарнирным соединением обеспечивает более благоприятное распределение напряжений по сравнению с традиционной прямолинейной балкой. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что при использовании шарнирного верхняка происходит снижение концентрации эквивалентных напряжений в центральной части конструкции и их перераспределение в сторону опорных зон, что уменьшает риск локальных разрушений.

Сравнительный анализ различных углов наклона составных элементов шарнирного верхняка показал, что наилучшие показатели достигаются при угле 25°. В этом случае фиксируется минимальная интенсивность напря-

жений и наиболее равномерное их распределение по всей длине верхняка. При углах 20° и 35° наблюдается увеличение напряжений в зоне шарнира, а при угле 30° – рост деформаций в центральной части конструкции, что свидетельствует о снижении эффективности данных вариантов.

Результаты физического моделирования, выполненного на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W, подтвердили выводы численного анализа. Испытания показали, что предельная нагрузка для прямолинейной балки составила 76,91 кН, тогда как для шарнирной конструкции с углом наклона 25° данный показатель достиг 117,78 кН. Таким образом, применение шарнирной схемы позволило увеличить несущую способность верхняка более чем на 50% по сравнению с традиционной конструкцией.

Кроме того, в ходе физических испытаний было установлено, что характер деформирования шарнирной крепи отличается более плавным развитием деформаций без резких скачков, что указывает на повышение ее работоспособности и устойчивости при возрастании нагрузки. Локализация зон максимальных деформаций, выявленных в ходе экспериментов, хорошо согласуется с результатами численного моделирования, что подтверждает корректность принятых расчетных предпосылок.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что бесстоечная шарнирная крепь обладает повышенной несущей способностью, более равномерно воспринимает горное давление и снижает нагрузку на боковые стенки выработки. Это подтверждает ее эффективность и целесообразность применения в условиях подготовительных горных выработок при сложном напряженном состоянии массива пород.

Компьютерное исследование показало, что наибольшую эффективность в плане снижения напряжений продемонстрировал верхняк с углами наклона его составных частей 25°. В этом случае интенсивность напряжений была ниже по сравнению с другими углами наклона, что позволило рекомендовать данный угол как оптимальный для реализации в конструктивной части крепи.

Для подтверждения численных результатов было проведено физическое моделирование на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W. Эксперименты включали испытания двух вариантов конструкции: прямой балки и балки, разделенной на две части шарниром.

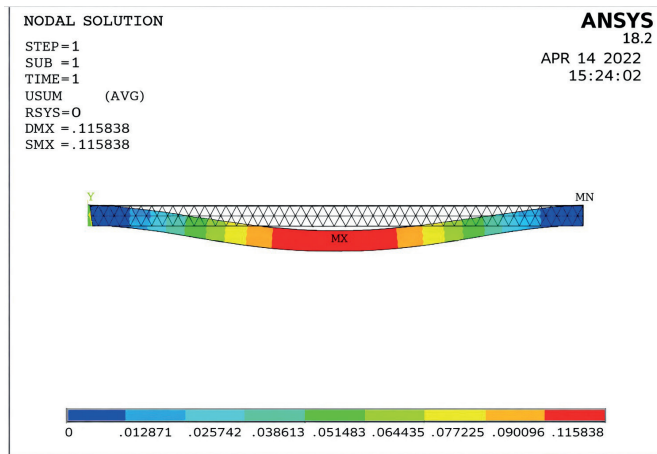
Результаты испытаний показали следующие значения предела прочности на сжатие:

- для прямой балки – 76,91 кН;
- для балки, разделенной на две части шарниром с углом наклона 25° – 117,78 кН.

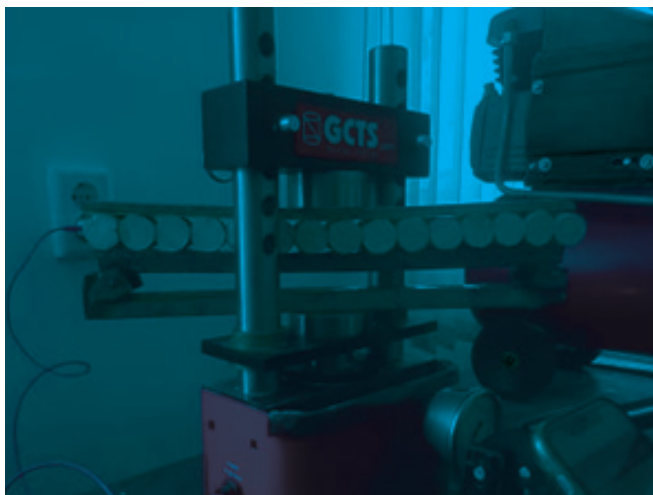
Кроме того, было подтверждено расположение точек с максимальными деформациями, что подтвердило расчетные данные о наиболее уязвимых участках конструкции, что позволит усилить крепь, применив дополнительные простые в изготовлении и установке конструктивные элементы [2].

Результаты моделирования для прямой балки приведены на рис. 1.

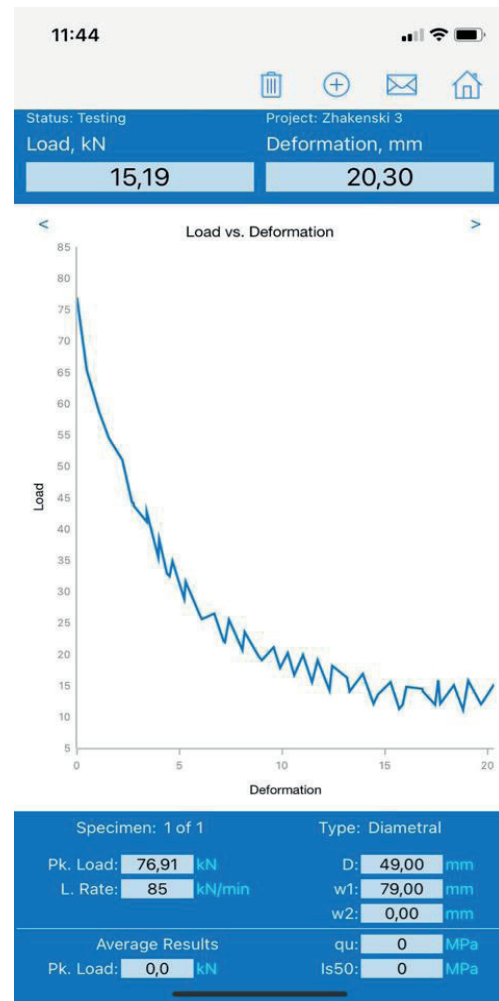
Анализ рисунка показывает хорошее соответствие результатов численного моделирования данным физического эксперимента. Максимальные деформации, локализован-



а)



б)



в)

Рис. 1. Результаты численного и физического моделирования работы верхняка бесстоечной крепи:

а) распределение вертикальных перемещений верхняка, полученное по результатам численного моделирования в программном комплексе ANSYS, демонстрирующее максимальные прогибы в центральной части балки; б) общий вид экспериментальной установки и образца верхняка в процессе физического моделирования на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W; в) экспериментальная диаграмма зависимости нагрузки от деформации, отражающая характер работы конструкции вплоть до достижения предельного состояния.

Сурет 1. Тірексіз крестің жоғарғы арқалығының жұмысын сандық және физикалық модельдеу нәтижелері:

а) ANSYS бағдарламалық кешенінде жүргізілген сандық модельдеу нәтижелері бойынша алынған үстіңгі арқалықтың тік орын ауыстыруларының таралуы, арқалықтың орталық бөлігінде ең үлкен иілудердің байқалатынын көрсетеді; б) GCTS PLT-2W гидравликалық пресінде физикалық модельдеу жүргізу барысында эксперименттік қондырғының және үстіңгі арқалық үлгісінің жалпы көрінісі; в) жүктеме мен деформация арасындағы тәуелділіктің эксперименттік диаграммасы, конструкцияның шекті күйге жеткенге дейінгі жұмыс сипатын бейнелейді.

Figure 1. Results of numerical and physical modeling of the performance of the strutless support top beam:

а) distribution of vertical displacements of the top beam obtained from numerical modeling results in the ANSYS software package, demonstrating maximum deflections in the central part of the beam; б) general view of the experimental setup and the top beam specimen during physical modeling on the GCTS PLT-2W hydraulic press; в) experimental load-deformation diagram reflecting the structural behavior up to the ultimate limit state.

ные в центральной части верхняка, подтверждают корректность принятой расчетной схемы. Экспериментальная кривая «нагрузка – деформация» характеризуется плавным снижением несущей способности после достижения пикового значения нагрузки, что свидетельствует о работоспособности конструкции и отсутствии хрупкого разрушения.

В результате численного моделирования напряженно-деформированного состояния верхняка бесстоеч-

ной крепи установлено, что максимальные вертикальные перемещения для конструкции в виде прямой балки достигают 20,30 мм, при этом наибольшие деформации локализуются в центральной части пролета. Максимальная воспринимаемая нагрузка в данном варианте конструкции составила 76,91 кН, что соответствует достижению предельного состояния по прочности.

Для шарнирной конструкции верхняка с углом наклона составных элементов 25° , определенным как оптимальный по результатам численного анализа, зафиксировано снижение максимальных напряжений и более равномерное распределение деформаций. Экспериментально установленная предельная нагрузка для данного варианта составила 117,78 кН, что превышает аналогичный показатель для прямолинейной балки на 40,87 кН, или примерно на 53%.

В ходе физического моделирования на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W при нагрузке 15,19 кН была зарегистрирована деформация образца, равная 20,30 мм, что соответствует начальному этапу интенсивного деформирования конструкции. Максимальная скорость нагружения в ходе эксперимента составляла 85 кН/мин, диаметр испытуемого образца – 49 мм, длина рабочей части – 79 мм.

Экспериментальная диаграмма «нагрузка – деформация» показала, что после достижения пикового значения нагрузки 76,91 кН для прямолинейной балки наблюдается постепенное снижение несущей способности без резкого разрушения, что указывает на пластический характер деформирования. Для шарнирной конструкции характер разрушения оказался более устойчивым, с плавным разви-

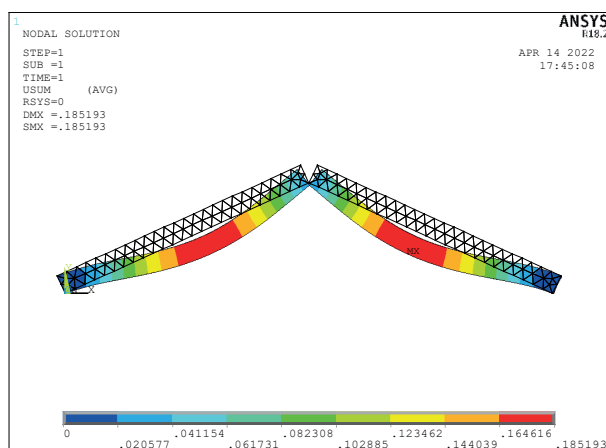
тием деформаций и отсутствием локальных концентраций напряжений.

Полученные численные значения подтверждают, что применение бесстоечной шарнирной крепи с углом наклона 25° обеспечивает значительное увеличение несущей способности, снижение уровня деформаций и повышение общей устойчивости конструкции по сравнению с традиционной прямолинейной схемой.

Результаты моделирования для бесстоечной шарнирной крепи приведены на рис. 2.

По результатам численного моделирования установлено, что максимальные эквивалентные напряжения в элементах шарнирного верхняка достигают 185,19 МПа. Наибольшие значения напряжений локализуются в зонах, прилегающих к шарнирному соединению и переходным участкам между центральной и боковыми частями конструкции, тогда как в центральной зоне наблюдается более равномерное распределение напряжений без выраженных концентраций.

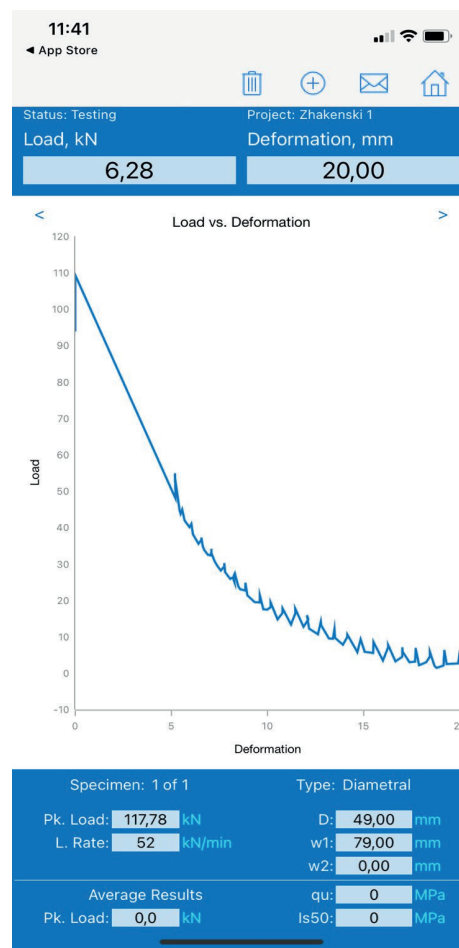
Максимальные вертикальные перемещения конструкции, полученные в ходе расчета, составляют 20,0 мм, что соответствует допустимому уровню деформаций для рассматриваемой схемы крепи. По сравнению с прямолиней-



а)



б)



в)

Рис. 2. Результаты моделирования для бесстоечной шарнирной крепи.

Сурет 2. Тірексіз шарнирлі бекітпе үшін модельдеу нәтижелері.

Figure 2. Modeling results for the strutless hinged support.

ной балкой отмечается снижение прогибов в центральной части и перераспределение деформаций в сторону боковых элементов.

Результаты физического моделирования, выполненного на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W, показали, что при деформации 20,0 мм текущая нагрузка составляет 6,28 кН, что соответствует стадии упругопластического деформирования конструкции. Максимальная воспринимаемая нагрузка для шарнирной крепи достигла 117,78 кН, что характеризует ее предельную несущую способность.

Скорость нагружения в ходе эксперимента составляла 52 кН/мин, диаметр испытуемого образца – 49 мм, длина рабочей части – 79 мм. Экспериментальная диаграмма «нагрузка – деформация» имеет плавный нисходящий характер после достижения пикового значения нагрузки, что указывает на отсутствие хрупкого разрушения и высокую энергоёмкость шарнирной конструкции.

Таким образом, совокупность численных и экспериментальных данных подтверждает, что бесстоечная шарнирная крепь обладает повышенной несущей способностью (117,78 кН) и более благоприятным напряженно-деформированным состоянием по сравнению с традиционной прямолинейной схемой, что свидетельствует о ее высокой эффективности при поддержании подготовительных горных выработок. Сводные количественные результаты численного и физического моделирования, а также процентное сравнение шарнирной крепи с прямолинейной балкой приведены в таблице 1.

Установлено, что применение бесстоечной шарнирной крепи с углом наклона 25° обеспечивает увеличение предельной несущей способности с 76,91 до 117,78 кН, что соответствует приросту на 53,1% по сравнению с прямолинейной балкой. При этом максимальные деформации конструкции остаются практически на одном уровне (около 20 мм), что свидетельствует о более эффективной работе конструкции без увеличения прогибов. Численное моделирование показало, что для шарнирной крепи

максимальные эквивалентные напряжения составляют 185,19 МПа и характеризуются более равномерным распределением по элементам конструкции, тогда как для прямолинейной балки наблюдаются выраженные локальные концентрации напряжений в центральной части пролета. Экспериментальные диаграммы «нагрузка – деформация» подтверждают, что шарнирная схема демонстрирует упругопластический характер деформирования с плавным снижением несущей способности после достижения пиковых нагрузок, в отличие от прямолинейной балки, для которой разрушение носит более резкий характер.

Как показано на рис. 3, шарнирная крепь демонстрирует более высокий уровень несущей способности и более устойчивый характер деформирования по сравнению с прямолинейной балкой.

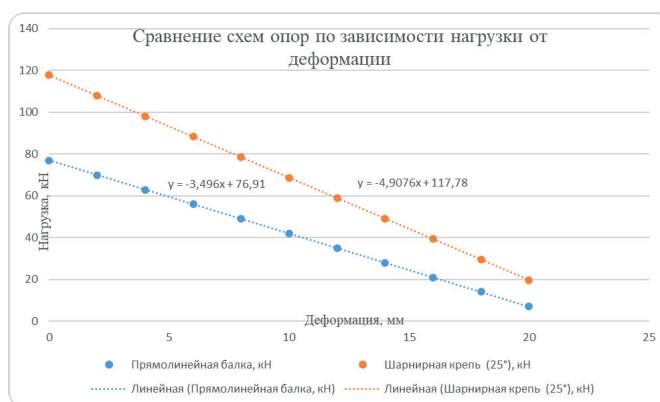


Рис. 3. Сравнительная диаграмма «нагрузка – деформация» для прямолинейной балки и бесстоечной шарнирной крепи (25°).

Сурет 3. Түзу арқалық пен тірексіз шарнирлі крепь (25°) үшін «жүктеме–деформация» салыстырмалы диаграммасы.

Figure 3. Comparative load–deformation diagram for a straight beam and a strutless hinged support (25°).

Сравнительные результаты численного и физического моделирования бескаркасных опор

Таблица 1

Қаңқасыз тіректерді сандық және физикалық модельдеудің салыстырмалы нәтижелері

Кесте 1

Comparative results of numerical and physical modeling of frameless supports

Table 1

Показатель	Прямолинейная балка	Шарнирная крепь (25°)	Изменение, %
Максимальная нагрузка, кН	76,91	117,78	+53,1 %
Максимальная деформация, мм	20,30	20,00	-1,5 %
Максимальные эквивалентные напряжения, МПа	выше, локальные концентрации	185,19 (равномернее распределены)	—
Характер деформирования	выраженная концентрация в центре	перераспределение к шарниру	—
Тип разрушения	ближе к хрупкому	упругопластический, плавный	—
Скорость нагружения, кН/мин	85	52	-38,8 %
Диаметр образца, мм	49	49	0
Длина рабочей части, мм	79	79	0

Анализ сравнительного графика «нагрузка – деформация» показывает существенные различия в работе прямолинейной балки и бесстоечной шарнирной крепи. Для прямолинейной балки максимальная воспринимаемая нагрузка составляет 76,91 кН, при этом при деформации 10 мм нагрузка снижается до approximately 34–36 кН, а при деформации 20 мм – до 10–12 кН, что свидетельствует о резком снижении несущей способности конструкции после достижения пикового значения.

В то же время для бесстоечной шарнирной крепи с углом наклона 25° максимальная нагрузка достигает 117,78 кН, что превышает аналогичный показатель прямолинейной балки на 40,87 кН, или 53,1%. При деформации 10 мм шарнирная конструкция сохраняет нагрузку на уровне 50–55 кН, что на 45–60% выше по сравнению с прямой балкой. При деформации 20 мм нагрузка шарнирной крепи составляет 22–25 кН, тогда как для прямолинейной балки данный показатель не превышает 12 кН.

Таким образом, при одинаковом уровне деформаций шарнирная крепь демонстрирует существенно более высокую остаточную несущую способность и более плавный характер снижения нагрузки. Площадь под кривой «нагрузка – деформация», характеризующая энергоёмкость конструкции, для шарнирной крепи значительно больше, что указывает на ее повышенную работоспособность и устойчивость к прогрессирующему деформированию.

Полученные числовые значения подтверждают, что внедрение шарнирного соединения позволяет не только

увеличить предельную нагрузку более чем на 50%, но и обеспечить более стабильную работу крепи в постпиковом режиме, что имеет важное практическое значение для поддержания подготовительных горных выработок в условиях повышенного горного давления.

Заключение

В работе выполнено численное и физическое моделирование работы бесстоечной шарнирной крепи. Установлено, что применение шарнирного соединения в верхняке обеспечивает более равномерное распределение напряжений и снижение их концентрации по сравнению с прямолинейной балкой. По результатам численного анализа оптимальным признан угол наклона составных элементов 25° , при котором достигаются минимальные значения эквивалентных напряжений.

Экспериментальные испытания показали, что предельная несущая способность шарнирной крепи составляет 117,78 кН, что на 53,1% выше, чем у прямолинейной балки (76,91 кН), при сопоставимых максимальных деформациях порядка 20 мм. Анализ диаграмм «нагрузка – деформация» подтвердил более устойчивый упругопластический характер работы шарнирной конструкции и ее повышенную энергоёмкость.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности бесстоечной шарнирной крепи и обосновывают целесообразность ее применения для поддержания подготовительных горных выработок в условиях повышенного горного давления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Байкенжин М.А., Рашид Ж.Б. Исследование работы безопорной шарнирной крепи в подготовительных выработках // Труды межд. научно-практической конф. «Сагиновские чтения», Караганда, 2021. С. 1141–1143 (на казахском языке)
2. Моделирование влияния усилителей из прокатного профиля на несущую способность арочной крепи / Байкенжин М. [и др.] // Mining of Mineral Deposits. 2022. Т. 16. № 1. С. 84–91 (на английском языке)
3. Хек Э., Браун Э.Т. Подземные выработки в скальных породах: Лондон: Институт горного дела и металлургии, 1980. 527 с. (на английском языке)
4. Брэди Б.Х.Г., Браун Э.Т. Механика горных пород для подземных горных работ. 3-е изд.: Дордрехт: Springer, 2004. 628 с. (на английском языке)
5. Пальмстрем А., Брэх Э. Использование и неправильное применение систем классификации массива горных пород с особым вниманием к системе Q // Tunnelling and Underground Space Technology. 2006. Т. 21. № 6. С. 575–593 (на английском языке)
6. Бартон Н. Качество горных пород, сейсмическая скорость, затухание и анизотропия: Boca Raton: CRC Press, 2006. 744 с. (на английском языке)
7. Ли Ц.Ц. Принципы проектирования анкерного крепления // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Т. 9. № 3. С. 396–414 (на английском языке)
8. Виндзор К.Р., Томпсон А.Г. Системы укрепления горных пород // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1992. Т. 29. № 4. С. 363–369 (на английском языке)
9. Сингх Б., Гозл Р.К. Инженерная классификация массива горных пород: тоннели, фундаменты и оползни: Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2011. 306 с. (на английском языке)
10. Контоянни В., Стирос С. Индуцированные деформации при проходке тоннелей: данные геодезического мониторинга // Engineering Geology. 2005. Т. 79. № 1–2. С. 115–126 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Байкенжин М.А., Рашид Ж.Б. Дайындық қазбаларындағы тірексіз шарнирлі бекітпенің жұмысын зерттеу // «Сагинов оқулары» халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының еңбектері, Қарағанды, 2021. Б. 1141–1143 (қазақ тілінде)
2. Байкенжин М., Асанова З., Рашид З., Касимов А., Иваделинова Д., Жунис Г. Аркалық бекітпенің көтергіш қабілетіне илектелген профильді күшейткіштердің әсерін модельдеу / Байкенжин М. [және т. б.] // Mining of Mineral Deposits. 2022. Т. 16. № 1. Б. 84–91 (ағылшын тілінде)

3. Хек Э., Браун Э.Т. Тау жыныстарындағы жерасты қазбалары: Лондон: Тау-кен және металлургия институты, 1980. 527 б. (ағылшын тілінде)
4. Брэди Б.Х.Г., Браун Э.Т. Жерасты тау-кен жұмыстарына арналған тау жыныстары механикасы. 3-басылым: Дордрехт: Springer, 2004. 628 б. (ағылшын тілінде)
5. Пальмстрем А., Броч Э. Тау жыныстары массивін жіктеу жүйелерін қолдану және қате қолдану (Q-жүйесі мысалында) // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. Т. 21. № 6. Б. 575–593 (ағылшын тілінде)
6. Бартон Н. Тау жыныстарының сапасы, сейсмикалық жылдамдық, әлсіреу және анизотропия: Boca Raton: CRC Press, 2006. 744 б. (ағылшын тілінде)
7. Ли С.С. Анкерлік бекітпені жобалау принциптері // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Т. 9. № 3. Б. 396–414 (ағылшын тілінде)
8. Виндзор К.Р., Томпсон А.Г. Тау жыныстарын бекіту жүйелері // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1992. Т. 29. № 4. Б. 363–369 (ағылшын тілінде)
9. Сингх Б., Гоэл Р.К. Тау жыныстары массивін инженерлік жіктеу: тоннельдер, іргемастар және көшкіндер: Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2011. 306 б. (ағылшын тілінде)
10. Контоянни В., Стирос С. Тоннель қазу кезіндегі индукцияланған деформациялар: геодезиялық бақылаулар деректері // *Engineering Geology*. 2005. Т. 79. № 1–2. Б. 115–126 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Baikenzhin M.A., Rashid Zh.B. Study of the performance of a strutless hinged support in development mine workings // *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Saginov Readings», Karaganda, 2021, 1141–1143 pp. (in Kazakh)*
2. Modeling the influence of rolled profile strengtheners on the load-bearing capacity of arch supports [et al.] / Baykenzhin M. // *Mining of Mineral Deposits*. 2022. V. 16. No. 1. 84–91 pp. (in English)
3. Hoek E., Brown E.T. *Underground Excavations in Rock*: London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980. 527 p. (in English)
4. Brady B.H.G., Brown E.T. *Rock Mechanics for Underground Mining: 3rd ed.* Dordrecht: Springer, 2004. 628 p. (in English)
5. Palmstrom A., Broch E. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. V. 21. No. 6. 575–593 pp. (in English)
6. Barton N. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*: Boca Raton: CRC Press, 2006, 744 p. (in English)
7. Li C.C. Principles of rockbolting design // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. V. 9. No. 3. 396–414 pp. (in English)
8. Windsor C.R., Thompson A.G. Rock reinforcement systems // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1992. V. 29. No. 4. 363–369 pp. (in English)
9. Singh B., Goel R.K. *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides*: Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. 306 p. (in English)
10. Kontogianni V., Stiros S. Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring // *Engineering Geology*. 2005. V. 79. No. 1–2. 115–126 pp. (in English)

Сведения об авторах:

Байкенжин М.А., к.т.н., доцент, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан), (г. Караганда, Казахстан), mbmqm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7345-3375>

Рашид Ж.Б., докторант ГДД-20-1, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан), (г. Караганда, Казахстан), zhuldyz.rashid@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4261-4786>

Очилов Ш.А., доктор Ph.D, доцент, заведующий кафедрой горного дела и технологий, Университет геологических наук (Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан), (г. Ташкент, Узбекистан), o.shuhrat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5611-482X>

Авторлар туралы мәліметтер:

Байкенжин М.А., т.ғ.к., доцент, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті (Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі), (Қарағанды қ., Қазақстан)

Рашид Ж.Б., ГДД-20-1 білім беру бағдарламасының докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті (Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі) (Қарағанды қ., Қазақстан)

Очилов Ш.А., Ph.D докторы, доцент, Тау-кен ісі және технологиялар кафедрасының меңгерушісі, Геология ғылымдары университеті (Өзбекстан Республикасы Жоғары білім, ғылым және инновациялар министрлігі) (Ташкент қ., Өзбекстан)

Information about the authors:

Baikenzhin M.A., Candidate of Technical Sciences (PhD equivalent), Associate Professor, Abylka Saginov Karaganda Technical University (Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan) (Karaganda, Kazakhstan)

Rashid Zh.B., Ph.D doctoral student (GDD-20-1), Abylka Saginov Karaganda Technical University (Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan), (Karaganda, Kazakhstan)

Ochilov Sh.A., Ph.D, Associate Professor, Head of the Department of Mining Engineering and Technologies, University of Geological Sciences (Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan) (Tashkent, Uzbekistan)