

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Белов Олег Дмитриевич

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ
ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВАЛОВ ДЛЯ БОРЬБЫ С КАМНЕПАДОМ С
БОРТА КАРЬЕРА

2.8.3 - «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор
Черепецкая Елена Борисовна

Москва, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На сегодняшний день тематика камнепадов, оползней, обрушений и обвалов является одной из наиболее актуальных при ведении открытых горных работ, что обусловлено потенциальной опасностью, которую они представляют для людей и техники. Также важность исследования процессов камнепадов связана и с малой изученностью данного вопроса. Анализ отечественных и зарубежных источников показал, что вопрос изучения камнепадов стал активно подниматься только в последние несколько лет, причем в российской литературе основная часть исследований посвящена авто- и железнодорожной отрасли, в то время как в зарубежной литературе эта тематика освещается применительно и к горнодобывающей промышленности.

Следует также отметить, что с каждым годом число камнепадов неуклонно растет. Это связано с климатическими изменениями и, в первую очередь, с изменением градиента температур, что увеличивает ширину раскрытия трещин в массивах горных пород и приводит к росту числа камнепадов.

На основании вышесказанного становится очевидным, что разработка метода, позволяющего обосновывать оптимальные характеристики противокамнепадных конструкций, является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка метода расчета параметров предохранительных валов при камнепадах с бортов карьеров при ведении открытых горных работ на основе численного моделирования кинематических, динамических и энергетических характеристик движения обломков.

Основная идея работы заключается в установлении закономерностей движения обломков камнепада в зависимости от геометрии склона и характеристик обломков для обоснования оптимальных характеристик предохранительных валов.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены и следующие задачи:

1. Провести анализ современной зарубежной и отечественной литературы по моделированию процессов камнепадов и противокамнепадных конструкций;
2. Обосновать выбор программного комплекса для моделирования камнепадных процессов;
3. Провести расчеты кинематических, динамических и энергетических характеристик движения обломков камнепада сферической формы на основе существующих аналитических моделей и нормативных документов для верификации результатов численного моделирования в выбранном программном комплексе;
4. Определить влияние геометрии склона и свойств обломков на динамические характеристики его движения.
5. Определить влияние геометрических размеров и физико-механических свойств материала предохранительных валов на энергию поглощения обломка.
6. Разработать метод расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера и методику на его основе, позволяющий определить оптимальные геометрические и геотехнические характеристики предохранительных валов исходя из геометрии склона и объема обломка.

Основные научные положения и их новизна:

1. Установлено, что наибольшей максимальной кинетической энергией при движении обломков камнепада с отскоком от склона при прочих равных параметрах обладает обломок эквивалентной формы.
2. Получены регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка эквивалентной формы от его объема для различных углов наклона и высот уступов на участке склона в диапазонах объемов от 0,5 до 10 м³, необходимые для проектирования предохранительных валов.

3. Разработан метод расчета параметров предохранительных валов, основанный на учете максимальной кинетической энергии обломка, позволяющий определить предельную энергию поглощения с учетом на основании конструкционных и геотехнических параметров.

Научная новизна работы заключается в:

- определении влияния формы обломка камнепада при прочих равных параметрах на его максимальную кинетическую энергию;
- установлении регрессионных зависимостей максимальной кинетической энергии обломка эквивалентной формы от угла наклона и высоты уступа для объемов от 0,5 до 10 м³,
- разработке метода расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера и методики на его основе, которые позволяют рассчитать оптимальные параметры предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера на основе прогнозируемых значений максимальной кинетической энергии обломка.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается сходимостью результатов моделирования, полученных с помощью программного комплекса RAMMS: Rockfall, с аналитическими расчетами и эмпирическими данными; высокой сходимостью значений максимальной кинетической энергии обломка, полученных по выведенным регрессионным моделям, с результатами численного моделирования.

Методы исследований включали анализ и обобщение результатов исследований в рассматриваемой области, приведенных в современной отечественной и зарубежной литературе; численное моделирование камнепадов в специализированном программном комплексе RAMMS: Rockfall; моделирование предохранительных валов в программном комплексе Plaxis 3D.

Научная значимость работы заключается в разработке метода расчета параметров предохранительных валов, основанного на учете максимальной кинетической энергии обломка.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики, позволяющей обосновать оптимальные геометрические и геотехнические параметры предохранительных валов на основе прогнозируемых значений максимальной кинетической энергии обломка, что существенно сократит временные и финансовые издержки на проектирование, а также уменьшит число несчастных случаев и повреждений специализированного оборудования и техники.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на XXXII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2024» (29.01.2024-02.02.2024, г. Москва, Россия); VII Международной научно-технической конференции «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия» (23.10.2024-24.10.2024, г. Донецк, Россия), XXXIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2025» (03.02.2025-07.02.2025, г. Москва, Россия), XII Международной научно-практической конференции: World of Science (30.04.25 г. Пенза, Россия), VII Международной научно-практической конференции: Актуальные вопросы, науки, общества и образования (05.09.25, г. Пенза, Россия)

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 6 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 3 из которых соответствуют профилю защищаемой диссертации.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений, изложенных на 124 страницах текста, включает 40 иллюстраций, 19 таблиц, 114 литературных источников.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность научному руководителю Черепецкой Елене Борисовне за сопровождение работы,

ценные советы и обсуждение, к.т.н., доценту кафедры физики Блохину Дмитрию Ивановичу за конструктивные замечания и предложения по численному моделированию движения обломков, Tatjana Scherrer и команде Team RAMMS за предоставление некоммерческой лицензии программного комплекса RAMMS:Rockfall, а также заведующему кафедры ФизГео Винникову Владимиру Александровичу за ценные замечания и предложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ зарубежной и отечественной литературы, посвященной камнепадным процессам, приведен обзор современных защитных сооружений.

Рассмотрены три основных этапа исследований по изучению камнепадов:

Этап I: (1969–2001 гг.)— Этот этап выделяется тем, что его публикации заложили основные критерии оценки опасности камнепадов.

Этап II: (2002–2016 гг.). —На данном этапе преобладают статьи, посвященные численному моделированию камнепадов [18,19], оценке рисков [20,21] и противокамнепадной защите.

Этап 3 (2017-2025 гг.) —появляются статьи, посвященные съемке с БПЛА [24], определению источника камнепада при помощи лидарной съемки и ГИС-систем.

Рассмотрены три основные категории публикаций, посвященных камнепадам. Первая группа описывает причины возникновения камнепадов и методы оценки рисков, вторая посвящена численному моделированию движения обломков, третья описывает меры по борьбе с камнепадами.

Также произведен выбор программного обеспечения для численного моделирования движения обломков по борту карьера. Для этого рассмотрено исследование, посвященное сопоставлению программных комплексов RockyFor3D и RAMMS:Rockfall на примере реально камнепада, произошедшего в Норвежской деревне Holaviki путем сопоставления результатов моделирования в каждом программном комплексе с эмпирическими данными.

На основе проведенного анализа были сформулированы приведенные выше задачи.

Во второй главе произведено определение влияния формы обломка на его максимальную кинетическую энергию.

На сегодняшний день в технической литературе принято выделять следующие формы обломков: сферическую, кубическую, эквивалентную (размеры обломка по трем направлениям примерно равны), плоскую (размеры по двум направлениям заметно превосходят размеры по третьему) и удлиненную (размеры по одному направлению заметно превосходят размеры по двум другим). В некоторых исследованиях рассматриваются формы обломков, которые являются промежуточными между вышеперечисленными случаями.

Перед проведением моделирования в программном пакете RAMMS:Rockfall рассмотрено движение обломка сферической формы объемом 1 м^3 . Расчет произведен на основании аналитических выражений, полученных в зарубежной литературе, а также отечественной нормативно-технической документации согласно ОДМ 218.2.051-2015 «Рекомендации по проектированию и расчету противообвальных сооружений на автомобильных дорогах».

Обломок начал движение в верхней точке поверхности, состоящей из двух уступов высотой 30 м с углом наклона $\alpha=50$ град. и бермы шириной 8 м (рисунок 1).

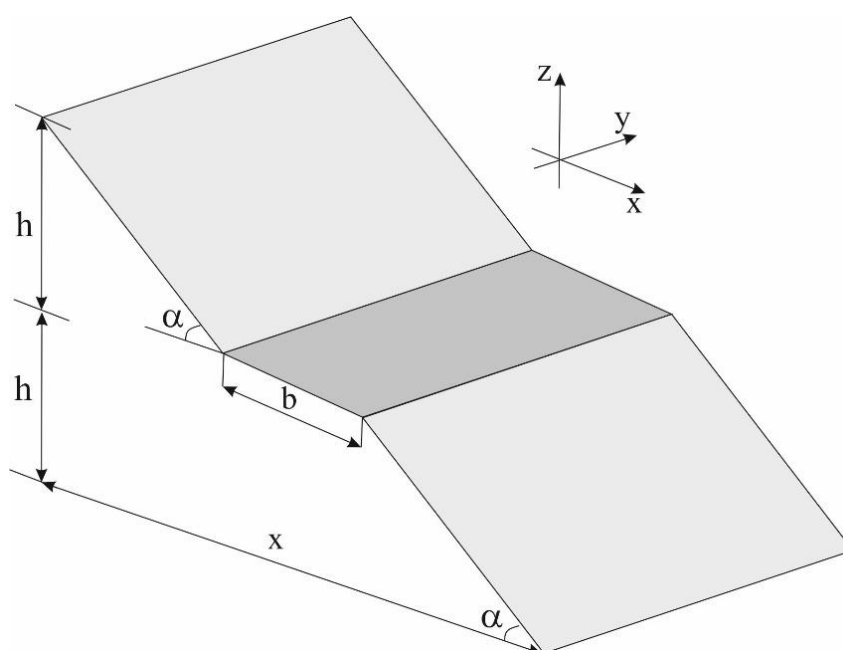


Рисунок 1 – Основные параметры модели

В работах, описывающих указанные аналитические расчетные схемы, обосновано, что при углах наклона склона $\alpha \approx 45\text{--}70$ град. движение сферически симметричного тела происходит без отрыва от поверхности. Учет неровностей поверхностей скольжения приводит к необходимости введения динамического коэффициента трения μ_d и динамического угла трения φ_d , определяемых следующим образом:

$$\mu_d = \operatorname{tg} \varphi_d = \operatorname{tg} \beta + k \cdot \frac{r}{R} \quad (1)$$

где $r \approx 0,21$ м – характерный размер неровностей на склоне, $k = 0,21$ – безразмерный коэффициент, $R = 0,63$ м – радиус сферического обломка. Также в показано, что при учете вращательной компоненты движения при перемещении обломка по наклонной плоскости значения угла внутреннего трения β , следует назначать в диапазоне от 23 до 33,8 град. Для указанных значений $\mu_d = 0,74$.

В соответствии с законом сохранения энергии максимальная скорость поступательного движения центра масс скального обломка V при переходе на горизонтальную поверхность (подошву нижнего уступа) и отсутствии начальной скорости будет равна:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - \mu_d \cdot X)} \quad (2)$$

где $H = 2h = 60$ м – высота падения обломка, $X = 58$ м – смещение по горизонтали. Принимая в расчетах $\beta = 33,8$ град., $g = 9,8$ м/с² получим, что значение скорости тела V в момент его перехода с нижнего уступа на горизонтальную поверхность, рассчитанное по формуле (2) значение будет равно 18,3 м/с.

Полная кинетическая энергия $E_{\text{полн}}$ сферического обломка в конечной точке спуска при учете незначительного проскальзывания складывается из двух частей: энергии поступательного $E_{\text{пост}}$ и вращательного $E_{\text{вращ}}$:

$$E_{\text{полн}} = E_{\text{пост}} + E_{\text{вращ}} \quad (3)$$

$$E_{\text{пост}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (4)$$

$$E_{\text{вращ}} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (5)$$

где $I = \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2$ – момент инерции, а $\omega = \frac{V}{R}$ – угловая скорость сферического обломка. Таким образом, значение полной кинетической энергии $E_{\text{полн}}$ составит 633 кДж.

На следующем этапе исследований производился расчет аналогичных энергетических и кинематических параметров для обломка сферической формы на основании ОДМ 218.2.05 – 2015. В соответствии с данным документом при расчете скоростей обломков V предполагается, что, независимо от топографии горного участка, по которому происходит движение, траектория движения обломка прямолинейна, а расчетное значение угла наклона склона усредняется по его длине. Скорость скального обломка сферической формы в этом случае рассчитывается по следующей формуле:

$$V = \varepsilon \cdot \sqrt[2]{H}, \quad (6)$$

где ε – коэффициент, определяемый в соответствии с ОДМ 218.2.05 – 2015. Для рассматриваемого случая ($\alpha = 50^\circ$) принимается $\varepsilon = 2,26$. Тогда значение скорости V , рассчитанное по формуле (6), составит 17,5 м/с.

В связи с тем, что ОДМ 218.2.05 – 2015 не регламентирует расчет полной кинетической энергии, произведем расчет по формуле (4) для скорости $V = 17,5$ м/с - получим $E_{\text{полн}} = 579$ кДж.

Для дальнейших численных экспериментов по оценке кинематических параметров движения обломка сферической формы в RAMMS:Rockfall физико-механические характеристики грунта, слагающего исследуемый склон, будут заданы как Hard, что идентично скальным горным породам. При расчете в модели не учитывалось разрушение грунта и его деформация.

На рисунке 2 приведен график зависимости кинетической энергии обломка сферической формы от горизонтального перемещения при движении по склону. Из приведенного на рисунке 2 графика можно сделать вывод, что максимальное значение кинетической энергии обломка достигается у основания нижнего уступа и составляет 570 кДж. При этом значение скорости будет равняться $V = 18,3$ м/с.

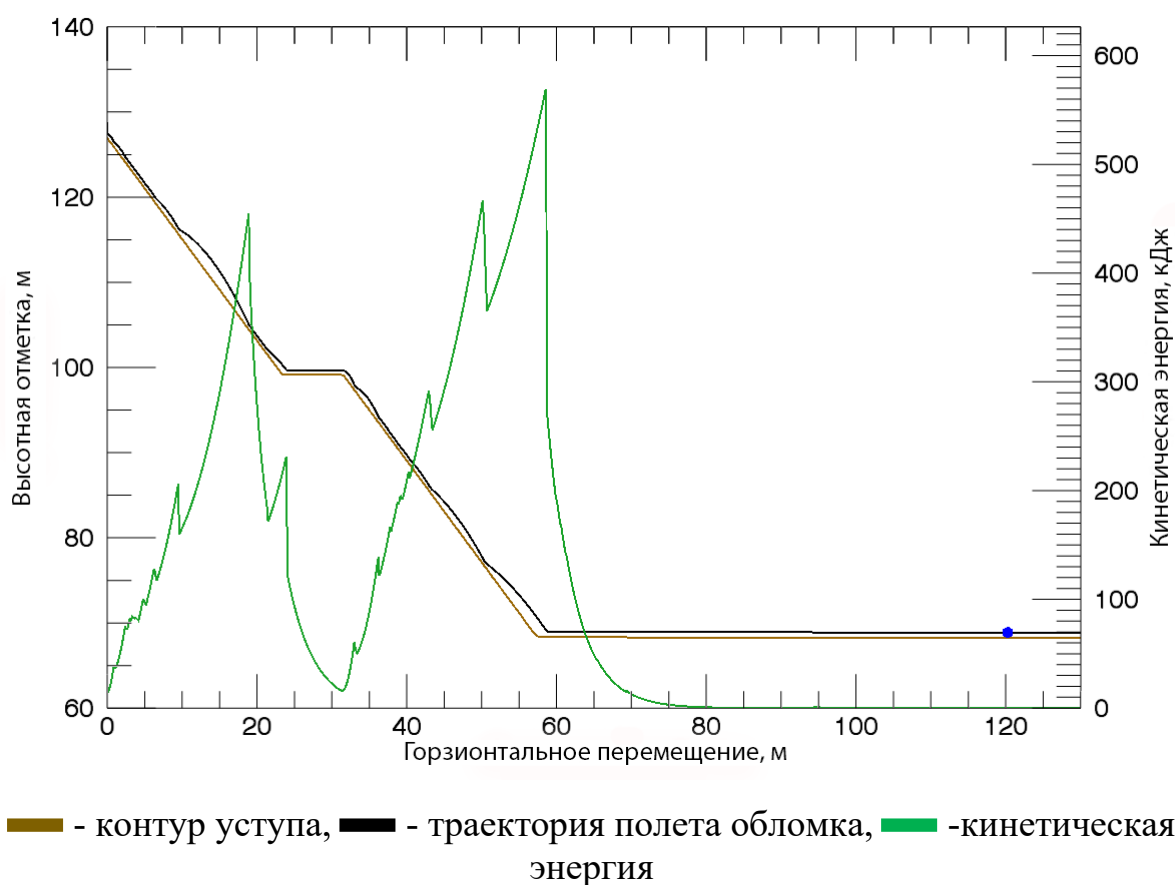


Рисунок 2 – Зависимость кинетической энергии обломка сферической формы от горизонтального перемещения при движении по склону

Сравнение значений скорости поступательного движения центра масс и полной кинетической энергии сферического скального обломка, полученных по результатам аналитических оценок и численного моделирования, приведено в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчетов максимальной кинетической энергии обломков и максимальной скорости поступательного движения центра масс различными методами

Методика расчета	Максимальная скорость центра масс, м/с	Максимальная кинетическая энергия, кДж	Горизонтальное перемещение, м
Численное моделирование в RAMMS:Rockfall	18,3	570	120,0
Аналитический расчет согласно [88]	18,3	633	106,5
Расчет согласно ОДМ 218.2.051-2015	17,5	579	118,5

По результатам сравнительного анализа выявлено, что методика, описанная в ОДМ 218.2.051-2015 «Рекомендации по проектированию и расчету противообвальных сооружений на автомобильных дорогах» наиболее близко описывает результаты численного моделирования по значениям максимальной кинетической энергии обломка и горизонтальному перемещению, однако она не учитывает форму обломка, что обуславливает необходимость проведения численного моделирования.

Также в данной главе проведено моделирование процессов движения обломков различных форм.

Для моделирования в RAMMS: Rockfall необходимо иметь данные топографической съемки изучаемого объекта. Для симуляции топографической съемки был написан программный код в среде Python, который на основе вводимых данных (высоты уступа, угла наклона и ширины бермы) создает трехмерное облако точек, имитирующее топографическую съемку.

Создана цифровая модель борта карьера, состоящая из двух уступов высотой 30 м с углом наклона 50 градусов и бермы шириной 8 м с удлиненной площадкой у подошвы нижнего уступа.

В связи с тем, что ключевым параметром является форма обломка, а не его объем, то все обломки будут заданы объемом 1 м^3 и плотностью 2700 кг/м^3 , как и при выполнении аналитических расчетов. В качестве горных пород, слагающих исследуемое месторождение, приняты скальные горные породы, не подверженные деформациям и разрушению.

Обобщение результатов моделирования приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Обобщенные результаты моделирования обломков различных форм

Форма обломка	Максимальная скорость, м/с	Максимальная высота отскока, м	Максимальная кинетическая энергия, кДж	Дальность полета, м
Кубическая	18,7	2,8	532,2	76,7
Сферическая	18,3	2,3	569,5	120,0
Эквивалентная	23,9	5,4	813,1	97,5
Плоская	14,9	2,1	337,5	32,3
Удлиненная	18,8	4,8	516,6	63,3

Поскольку наибольшей кинетической энергией обладает обломок эквивалентной формы, то дальнейшее моделирование проведено для обломков данной формы.

В третьей главе определено влияние высоты уступа и угла наклона на максимальную кинетическую энергию обломка эквивалентной формы.

Для имитации склона и проведения численного моделирования было создано несколько трехмерных моделей, состоящих из двух уступов с различными комбинациями следующих параметров: высотой $h = 15 \text{ м}$, 30 м и 45 м , углами наклона $\alpha = 50 \text{ град.}$, 60 град. и 70 град. , шириной бермы $b = 8 \text{ м}$ и горизонтальной площадкой в основании модели. Моделирование будет производиться для обломков с объемами от $0,5$ до 10 м^3 , что описывает полный диапазон объемов, встречающихся при проведении открытых горных работ.

В результате проведения моделирования различных объемов обломков для моделей с углами наклона 50 град. , 60 град. и 70 град. , шириной бермы 8 м

и высотой уступа 30 м были получены следующие значения максимальной кинетической энергии обломков, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 - Зависимость максимальной кинетической энергии обломка от его объема и угла наклона с высотой уступов 30 метров

Объем обломка, м ³	Максимальная кинетическая энергия обломка, кДж, при различных значениях угла наклона уступа		
	50 град.	60 град.	70 град.
0,5	317	353	389
1	650	716	801
2	1309	1443	1664
3	2012	2185	2680
4	2908	3105	3684
5	3914	4269	4584
6	5083	5615	6111
8	7652	8154	8478
10	10485	12179	13798

График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для каждого угла наклона представлен на рисунке 5.

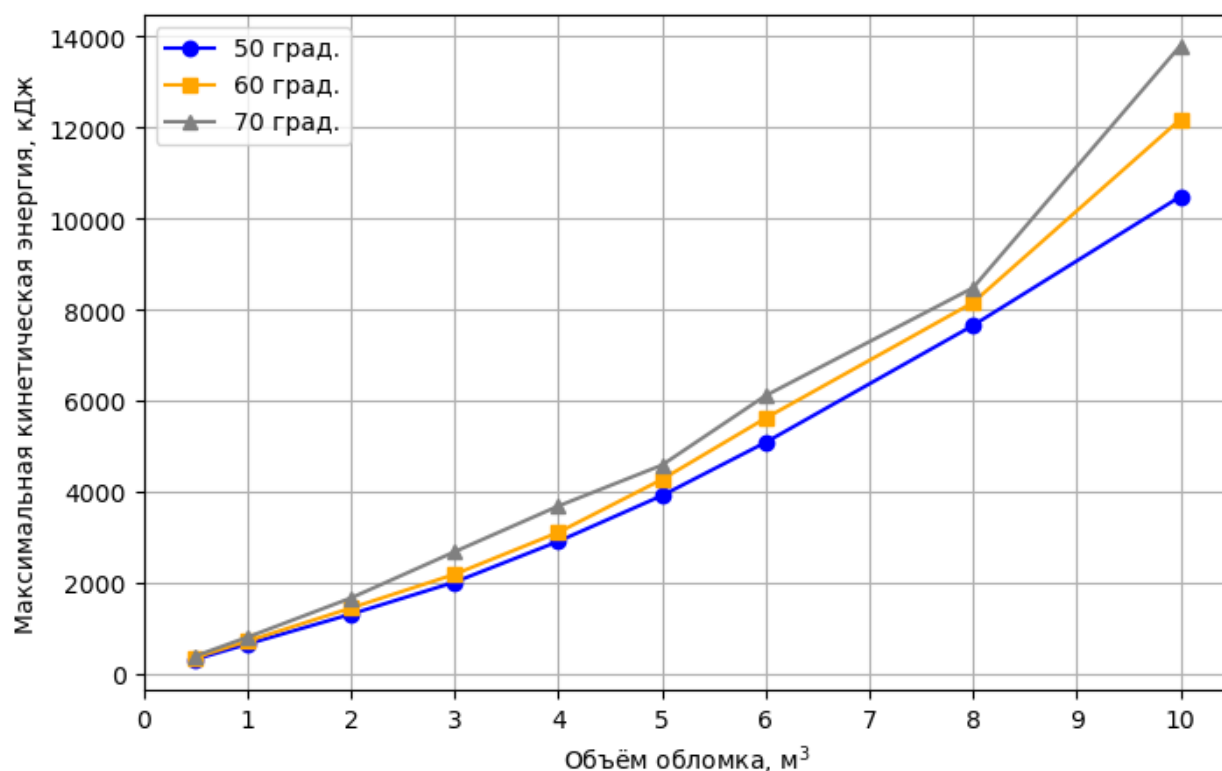


Рисунок 5 – График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для различных углов наклона

Определена удельная максимальная кинетическая энергия обломка (энергия, приходящаяся на 1 м³ обломка), для каждого угла наклона путем деления соответствующего значения максимальной кинетической энергии на его объем.

На основании анализа графика, представленного на рисунке 5, можно сделать вывод, что зависимость максимальной кинетической энергии обломка от его объема представляет собой полином второй степени. Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для уступа высотой 30 м приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для высоты уступа 30 метров и углов наклона 50,60 и 70 град.

Угол наклона, град.	Регрессионные зависимости
50	$y = 53,93 \cdot x^2 + 508,13 \cdot x + 53,73$
60	$y = 75,38 \cdot x^2 + 425,83 \cdot x + 207,42$
70	$y = 89,99 \cdot x^2 + 395,36 \cdot x + 400,19$

По выражениям, приведенным в таблице 4, произведен расчет максимальной кинетической энергии для обломков эквивалентной формы объемами 2,5 м³ и 7 м³. Данные объемы лежат в границах полученных графиков, однако не участвовали в их построении. Также произведено численное моделирование с обломками данных объемов. Сравнение расчетных значений кинетической энергии на основе регрессионных зависимостей и значений, полученных в ходе численного моделирования представлено в таблице 5. Расхождение между результатами численного моделирования и расчетными значениями не превысило 4,0%.

Таблица 5 - Сравнение расчетных значений максимальной кинетической энергии и результатов моделирования

Объем обломка, м ³	Кинетическая энергия обломка, кДж					
	Расчетные значения			Результаты моделирования		
	50 град.	60 град.	70 град.	50 град.	60 град.	70 град.
2,5	1664	1743	1951	1448	1697	2082
7	6256	6882	7577	6184	6836	7584

При этом по результатам, представленным в таблице 5 видно, что в каждом случае, значения, полученные в результате численного моделирования в RAMMS:Rockfall, очень близки к расчетным, таким образом, использование данных уравнений для определения ожидаемой максимальной кинетической энергии с последующим расчетом на основе этих значений геометрических и геотехнических параметров предохранительного вала позволит обеспечить необходимый запас по прочности.

Аналогичный расчет произведен для высот уступов 15 и 45 метров. Регрессионные зависимости представлены в таблицах 6 и 7 соответственно.

Таблица 6 – Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для высоты уступа 15 метров и углов наклона 50,60 и 70 град.

Угол наклона, град.	Регрессионные зависимости
50	$y = 7,76 \cdot x^2 + 313,96 \cdot x + 26,70$
60	$y = 6,06 \cdot x^2 + 386,64 \cdot x + 56,09$
70	$y = 5,12 \cdot x^2 + 466,36 \cdot x + 90,45$

Таблица 7 – Регрессионные зависимости кинетической энергии обломка от его объема для высоты уступа 45 метров и углов наклона 50,60 и 70 град.

Угол наклона, град.	Регрессионные зависимости
50	$y = 4,09 \cdot x^2 + 1001,20 \cdot x + 52,96$
60	$y = 16,02 \cdot x^2 + 1185,80 \cdot x - 137,97$
70	$y = 36,85 \cdot x^2 + 1494,6 \cdot x + 475,82$

В четвертой главе проведен расчет энергии поглощения предохранительных противокаменных валов с учетом их геометрических и геотехнических параметров/

Для создания конечно-элементной модели вала требуется задать геометрические характеристики самого вала: высоту h , ширину b и глубину d , а также угол заложения откосной части α . Схема предохранительного вала представлена на рисунке 6.

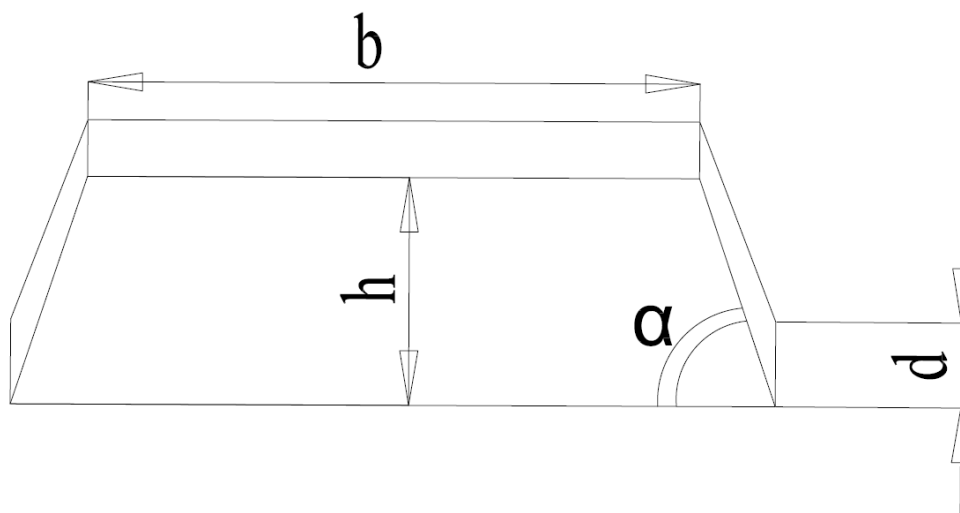


Рисунок 6 – Геометрические характеристики предохранительного вала

Высоту барьера определим, исходя из максимальной высоты отскока обломка эквивалентной формы объемом 1 м^3 , которая равняется 5,4 м. Следовательно, высота барьера должна быть не меньше данного значения. Для создания первичной модели примем высоту равной 6,0 м. Ширину барьера возьмем равной удвоенной высоте (12 м), глубину – половине высоты (3 м).

Также для создания конечно-элементной модели требуется определить характеристика грунта отсыпки предохранительного вала. Физико-механические характеристики грунтов определены в соответствии с приложением А СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83». Удельный вес грунта $\gamma=16 \text{ кН/м}^3$, модуль Юнга $E=44 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu=0,33$, удельное сцепление $c=45 \text{ кПа}$, угол внутреннего трения $\varphi=34^\circ$.

При расчете принято допущение, что вся кинетическая энергия обломка $E_{\text{полн}}$ переходит в работу деформации A_{def} грунта, которая в свою очередь равняется предельной энергии поглощения предохранительного вала W .

$$E_{\text{полн}} = A_{\text{def}} = W = 813 \text{ кДж} \quad (7)$$

Тогда средняя сила, приложенная к поверхности предохранительного вала, определяется соотношением:

$$F = \frac{A_{\text{def}}}{d} = \frac{813 \cdot 10^3}{3} = 271 \text{ кН} \quad (8)$$

где d – глубина предохранительного вала, м

При значении средней силы $F = 271 \text{ кН}$ давление на грунт:

$$P = \frac{F}{S} = 244 \text{ кН/м}^2 \quad (9)$$

где $S = 1,11 \text{ м}^2$ – площадь контакта обломка с поверхностью предохранительного вала.

Нагрузка будет задаваться как динамическая с затуханием на 10% каждые 0,025 с – таким образом будет имитироваться поглощение энергии предохранительным валом.

На следующем этапе расчетов проведено исследование влияния изменения физико-механических свойств грунта отсыпки на абсолютную деформацию предохранительного вала по направлению приложения нагрузки. Для каждого набора входных параметров было проведено моделирование с возрастанием энергии обломка до тех пор, пока абсолютная деформация предохранительного вала не сравняется с его глубиной, что позволило оценить предельное значение кинетической энергии обломка, которую может поглотить предохранительный вал без разрушения. Сводная таблица

результатов численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов приведена в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов

Глубина вала, м	Характеристики грунта					Энергия поглощения барьера, кДж
	Грунт	Удельное сцепление, кПа	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, °	
3	Супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34	20070
3		20	44	0,33	34	27489
3		25	44	0,33	34	31848
3		30	44	0,33	34	35141
3		35	44	0,33	34	38555
3		40	44	0,33	34	38901
3		45	44	0,33	34	41239
3		45	14	0,33	34	38268
3		45	19	0,33	34	39930
3		45	24	0,33	34	40519
3		45	29	0,33	34	40786
3		45	34	0,33	34	41019
3		45	39	0,33	34	41119
3	Щебень	45	44	0,22	34	40862
3	Брекчия	45	44	0,27	34	41052
3	Суглинок	45	44	0,4	34	41452
3	Супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20	21602
3		45	44	0,33	25	28245
3		45	44	0,33	30	35794
3		45	44	0,33	40	49734
2		45	44	0,33	34	8940
1		45	44	0,33	34	660
4		45	44	0,33	34	101880
5		45	44	0,33	34	214757

На основании значений, полученных при помощи численного моделирования, и программного кода в среде Python, был произведен подбор оптимального уравнения регрессии, которое связывает глубину предохранительного вала d [м] и физико-механические характеристики грунта (модуль Юнга E [МПа], коэффициент Пуассона ν , удельное сцепление c [кПа], угол внутреннего трения φ [°]) с его предельной энергией поглощения. В результате выбора оптимального уравнения регрессии получены следующие результаты: линейная регрессия – значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,176; полиномиальная регрессия

второй степени - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,963; полиномиальная регрессия третьей степени - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,732; логарифмическая регрессия - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,750; гиперболическая регрессия - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,421; экспоненциальная регрессия - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,719. Таким образом, полиномиальная регрессия второй степени наиболее достоверно описывает зависимость предельной энергии поглощения предохранительного вала от его геометрических и геотехнических параметров.

$$W = S \cdot d \cdot (k_0 + k_d \cdot d + k_c \cdot c + k_E \cdot E + k_v \cdot v + k_\varphi \cdot \varphi + k_{d^2} \cdot d^2 + k_{dc} \cdot d \cdot c + k_{dE} \cdot d \cdot E + k_{dv} \cdot d \cdot v + k_{d\varphi} \cdot d \cdot \varphi + k_{c^2} \cdot c^2 + k_{cE} \cdot c \cdot E + k_{cv} \cdot c \cdot v + k_{c\varphi} \cdot c \cdot \varphi + k_{E^2} \cdot E^2 + k_{Ev} \cdot E \cdot v + k_{E\varphi} \cdot E \cdot \varphi + k_{v^2} \cdot v^2 + k_{v\varphi} \cdot v \cdot \varphi + k_{\varphi^2} \cdot \varphi^2) \quad (10)$$

Коэффициенты подстановки приведены в таблице 13.

Таблица 9 – Коэффициенты подстановки для уравнения энергии поглощения

Коэффициент	Значение	Размерность
k_0	–8150	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
k_d	–0,386	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м}^2}$
k_c	0,340	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_E	–0,030	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_v	–14,4	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
k_φ	–0,094	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{d^2}	1911	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}$
k_{dc}	–16,4	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{dE}	–17,1	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{dv}	–43,3	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м}^2}$

Продолжение таблицы 9

Коэффициент	Значение	Размерность
$k_{d\varphi}$	-13,4	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{c2}	-6,70	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{cE}	13,6	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{cv}	-647	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
$k_{c\varphi}$	7,34	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{E2}	-2,83	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{Ev}	-632	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
$k_{E\varphi}$	-5,14	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{v2}	111420	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
$k_{v\varphi}$	-489	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{м}^2}$
$k_{\varphi2}$	8,12	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$

По формуле (10) был произведен расчет энергии поглощения для каждого набора входных данных, сравнение представлено в таблице 10.

Таблица 10 – Сравнение расчетных значений и результатов численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов

Глубина вала, м	Характеристики грунта					Энергия поглощения вала, кДж	
	Грунт	Уд. сцеп., кН/м ²	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, град.	Результаты моделирования	Расчетные значения
3	Супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34	20070	21159
3		20	44	0,33	34	27489	27036
3		25	44	0,33	34	31848	31795
3		30	44	0,33	34	35141	35441
3		35	44	0,33	34	38555	37969
3		40	44	0,33	34	38901	39381
3		45	44	0,33	34	41239	39677
3		45	14	0,33	34	38268	38212
3		45	19	0,33	34	39930	39634

Продолжение таблицы 10

Глубина вала, м	Характеристики грунта	Энергия поглощения вала, кДж	Глубина вала, м	Характеристики грунта	Энергия поглощения вала, кДж	Глубина вала, м	Характеристики грунта
3	Супеси и пески элювиальные	45	24	0,33	34	40519	40586
3		45	29	0,33	34	40786	41066
3		45	34	0,33	34	41019	41076
3		45	39	0,33	34	41119	40613
3	Щебень	45	44	0,22	34	40862	44236
3	Брекчия	45	44	0,27	34	41052	41052
3	Суглинок	45	44	0,4	34	41452	41452
3	Супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20	21602	23783
3		45	44	0,33	25	28245	28242
3		45	44	0,33	30	35794	34056
3		45	44	0,33	40	49734	49734
2		45	44	0,33	34	8940	9577
1		45	44	0,33	34	660	595
4		45	44	0,33	34	101880	103621
5		45	44	0,33	34	214757	214136

Расхождение результатов численного моделирования и расчетных значений составила 2,5%, что является достаточным для оценки энергии поглощения барьера без проведения численного моделирования

Дополнительно произведена оценка статистической значимости коэффициентов регрессии, представленных в формуле (4.4). Для каждого коэффициента рассчитываются t критерий Стьюдента, путем деления коэффициента регрессии на соответствующую ему стандартную ошибку, и уровень значимости p . Критерий значимости: $\alpha = 0,05$, это значит, что при уровне значимости p меньше критерия значимости α статистический коэффициент будет считаться значимым.

В формуле (11) приведено уравнение регрессии с исключением статистически незначимых коэффициентов.

$$\begin{aligned}
 W = S \cdot d \cdot (& k_0 + k_{d^2} \cdot d^2 + k_{dc} \cdot d \cdot c + k_{dE} \cdot d \cdot E + k_{dv} \cdot d \cdot v \\
 & + k_{d\varphi} \cdot d \cdot \varphi + k_{c^2} \cdot c^2 + k_{cE} \cdot c \cdot E + k_{cv} \cdot c \cdot v + k_{c\varphi} \\
 & \cdot c \cdot \varphi + k_{E^2} \cdot E^2 + k_{Ev} \cdot E \cdot v + k_{E\varphi} \cdot E \cdot \varphi + k_{v^2} \cdot v^2 \\
 & + k_{v\varphi} \cdot v \cdot \varphi + k_{\varphi^2} \cdot \varphi^2)
 \end{aligned} \quad (11)$$

По формуле (11) произведен аналогичный расчет и выполнено сопоставление со значениями, полученными по формуле (10). Сопоставление представлено в таблице 11.

Таблица 11 – Сопоставление значений предельной энергии поглощения вала, полученных по формулам (10) и (11)

Глубина вала, м	Характеристики грунта					Энергия поглощения вала, кДж	
	Грунт	Удельное сцепление, кН/м ²	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, град.	Формула 10	Формула 11
3	Супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34	21159	21176
3		20	44	0,33	34	27036	27047
3		25	44	0,33	34	31795	31802
3		30	44	0,33	34	35441	35441
3		35	44	0,33	34	37969	37964
3		40	44	0,33	34	39381	39370
3		45	44	0,33	34	39677	39661
3		45	14	0,33	34	38212	38192
3		45	19	0,33	34	39634	39616
3		45	24	0,33	34	40586	40568
3		45	29	0,33	34	41066	41048
3		45	34	0,33	34	41076	41057
3		45	39	0,33	34	40613	40595
3		45	44	0,22	34	44236	44215
3		45	44	0,27	34	41052	41032
3	Суглинок	45	44	0,4	34	41452	41437
3	Супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20	23783	23762
3		45	44	0,33	25	28242	28224
3		45	44	0,33	30	34056	34037
3		45	44	0,33	40	49734	49718
2		45	44	0,33	34	9577	9566
1		45	44	0,33	34	595	588
4		45	44	0,33	34	103621	103601
5		45	44	0,33	34	214136	214114

Максимальное расхождение между значениями, полученными по формулам (10), и (11) составило 1,18 %. Таким образом, исключение статически незначимых коэффициентов позволило оптимизировать формулу без потери точности расчета энергии поглощения предохранительного вала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи по обоснованию и разработке метода расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера, что позволяет существенно упростить проектирование предохранительных валов и обеспечить безопасность при проведении открытых горных работ.

Основные научные и практические результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Проведены анализ и систематизация отечественного и зарубежного опыта по исследованию процессов камнепада.
2. Обоснован выбор программного комплекса для моделирования камнепадных процессов.
3. Выполнено сравнение кинематических и динамических характеристик движения обломка сферической формы на основе аналитического расчета и численного моделирования.
4. Определено влияния формы обломка камнепада на его скорость, кинетическую энергию, дальность полета и высоту отскока.
5. Выявлено, что обломок эквивалентной формы характеризуется максимальной кинетической энергии относительно остальных форм при прочих равных.
6. Получены регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для разных комбинаций высот и углов наклона уступов.
7. Выявлено, что зависимость максимальной кинетической энергии обломка эквивалентной формы от его объема представляет собой полином второй степени для объемов в диапазоне от 0,5 до 10 м³.

8. Определено, что при увеличении объема обломка камнепада эквивалентной формы наблюдается рост удельной кинетической энергии обломка.

9. Выявлено, что наибольшее влияние на предельную энергию поглощения противокамнепадного предохранительного вала оказывает удельное сцепление грунта и глубина вала.

10. Получена регрессионная зависимость энергии поглощения предохранительного вала от его геометрических и геотехнических параметров.

11. Разработан метод расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера и методика на его основе, которые позволяют рассчитать оптимальные параметры предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера на основе прогнозируемых значений максимальной кинетической энергии обломка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:
В изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Белов О. Д. Сравнительный анализ современного программного обеспечения для моделирования камнепадов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 155–169. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_155.

2. Белов О.Д. Зависимость кинетической энергии, максимальной высоты отскока, горизонтального перемещения и скорости обломка камнепада от его формы // Труды РАНМИ. 2024. №3 (41). DOI 10.24412/2519-2418-2024-341-246-267

3. Belov O.D., Cherepetskaya E.B., Blokhin D.I. The products shape influence investigation of rock fall processes on their kinematic and energy parameters. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 195–203. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-195-203.

4. Белов О. Д. Оценка энергии поглощения предохранительных противокамнепадных валов с учетом их конструкционных и геотехнических параметров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 24–37. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_24.

В прочих изданиях:

5. Белов О. Д. Расчет оптимальных параметров противокамнепадного предохранительного вала // World of science: сборник статей XII Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 апреля 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. – С. 335-338.

6. Белов О.Д. Определения влияния объема обломка камнепада эквивалентной формы на его максимальную кинетическую энергия для различных комбинаций высот уступов и углов наклона // Актуальные вопросы науки, общества и образования. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции (05.09.2025, г. Пенза). – 2025, с. 223-228.