

## Научная статья

УДК 004.94 : 622.256.753 : 622.678.53

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-144-157

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСЫПИ ШАХТНОГО СКИПА В  
ROCKY DEM ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК НА КЛИНОВОЙ  
ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫЙ ПОЛОК****Аксенов Владимир Валерьевич<sup>1</sup>, Копытов Александр Иванович<sup>2</sup>,  
Пашков Дмитрий Алексеевич<sup>2</sup>, Вети Ахмед Аиманович<sup>2,3</sup>**<sup>1</sup> Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева<sup>3</sup> ЗСФ ООО «АЗОТ МАЙНИНГ СЕРВИС»

\* для корреспонденции: 55vva42@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

24 декабря 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

25 июня 2026 г.

**Ключевые слова:***Вертикальный ствол,  
скиповой подъем, клиновой  
предохранительный полк,  
аварийная просыпь,  
магнетитовая руда, МДЭ***Аннотация.**

В ходе реконструкции горнодобывающих предприятий важной задачей является совмещение углубки вертикального ствола с работой эксплуатационного подъема, осуществляющего выдачу горной массы на поверхность. Углубка стволов представляет собой ключевой этап реконструкции, поскольку только после ее завершения становится возможным выполнение горнопроходческих и подготовительных работ на нижележащих горизонтах, обеспечивающих доступ к новым запасам полезного ископаемого. В этих условиях безопасность проходчиков обеспечивается предохранительными полками, воспринимающими ударные воздействия от технологической просыпи горной массы, образующейся во время работы загрузочного устройства или аварийной саморазгрузки скипов. Существующие методы определения ударных нагрузок на предохранительные полки опираются преимущественно на эмпирические зависимости, включающие значительное число трудноопределяемых коэффициентов. Это снижает точность расчетов и ограничивает их применимость в современной инженерной практике. Повышение достоверности оценки нагрузок требует использования математического моделирования и современных численных методов. В настоящем исследовании выполнено моделирование падения просыпи горной массы методом дискретных элементов в программном комплексе Rocky DEM с целью определения параметров контактных нагрузок на клиновой предохранительный полк. Полученные результаты являются исходными данными для расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкции в CAE FIDESYS. Применение такого подхода позволяет повысить точность результатов и обосновать параметры клинового предохранительного полка.

**Для цитирования:** Аксенов В.В., Копытов А.И., Пашков Д.А., Вети А.А. Имитационное моделирование просыпи шахтного скипа в Rocky DEM для определения нагрузок на клиновой предохранительный полк // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 144-157. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-144-157, EDN: FZEGSI

**Введение**

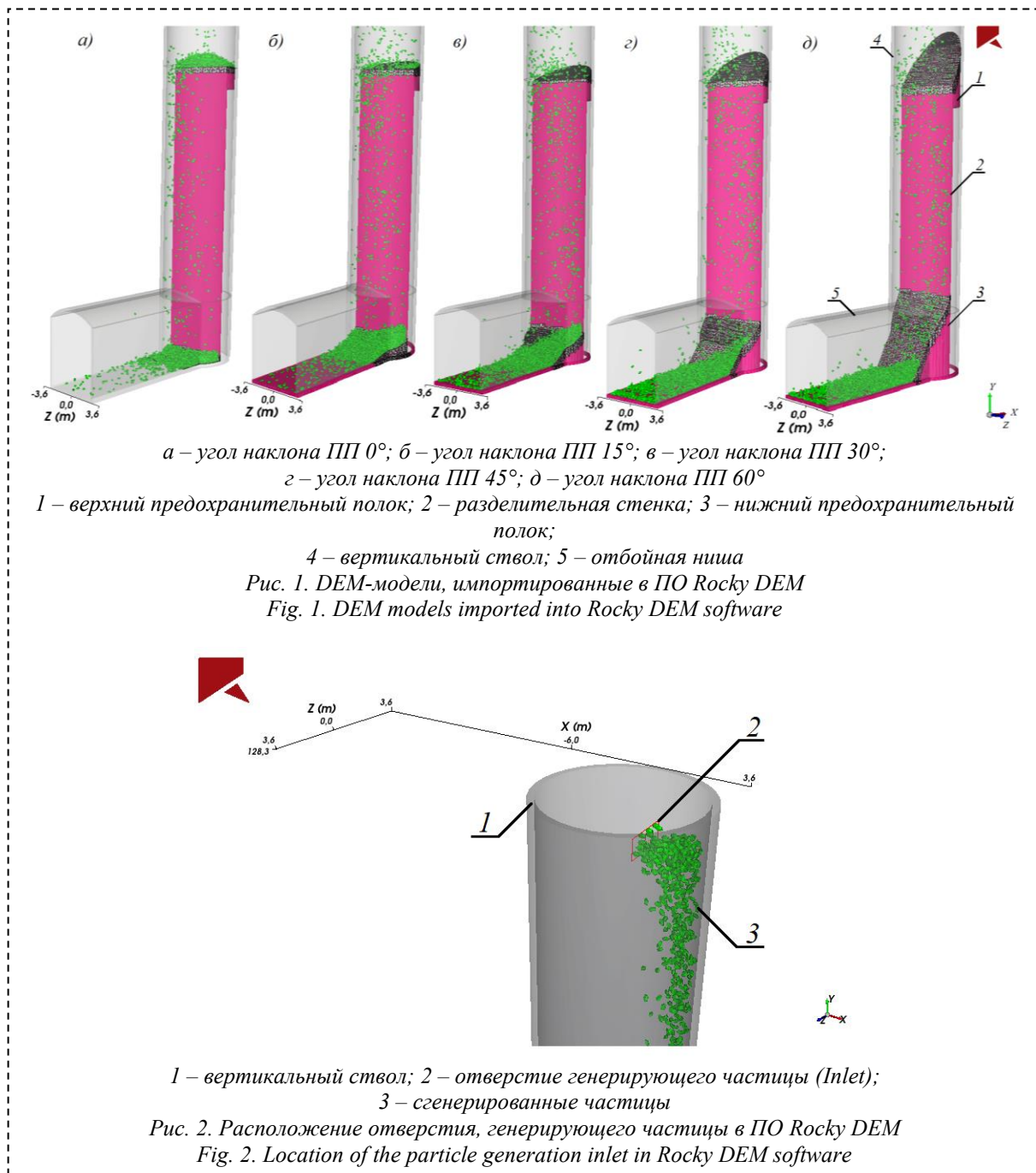
Одной из характерных особенностей современного подземного строительства является увеличение глубины залегания месторождений, что, в свою очередь, требует

углубки вертикальных стволов [1]. Углубка стволов относится к числу ключевых задач горнодобывающей промышленности, от решения которых зависят безопасность шахтных работ и

эффективность добычи полезных ископаемых [2–3].

Процесс углубки вертикальных стволов представляет собой горнопроходческую операцию, сопровождаемую риском падения в забой кусков руды, породы и иных предметов с большой высоты [4–6]. Обеспечение безопасности проходчиков в таких условиях достигается применением предохранительных полков.

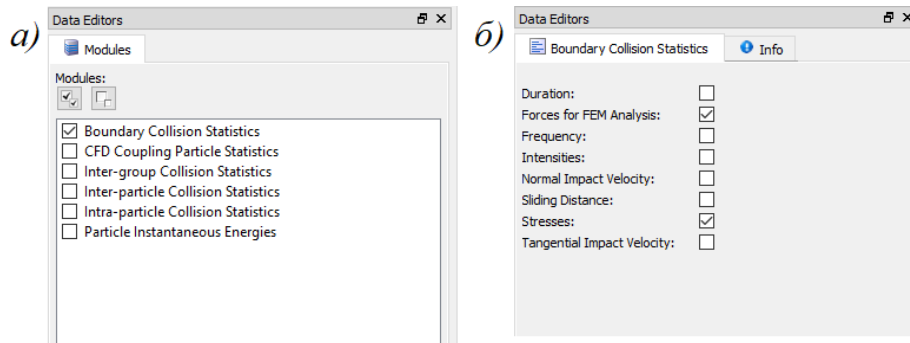
Выбор параметров предохранительных полков (ПП) определяется прежде всего корректной оценкой величины нагрузок, которые возникают при углубке ствола. От точности их определения зависит эффективность защиты забоя: завышенные расчетные значения приводят к необоснованному увеличению расхода материалов при сооружении предохранительного полка, тогда как заниженные не обеспечивают требуемого уровня безопасности углубляемой части ствола [7–9].



Действующие методы определения ударных нагрузок на предохранительные полки не удовлетворяют современным требованиям [10–13]. Это связано с тем, что расчетные зависимости преимущественно основаны на эмпирических формулах, включающих значительное количество коэффициентов, трудных для достоверного определения.

Коллектив авторов на протяжении ряда лет проводит исследования по определению

параметров клиновых предохранительных полков для углубки вертикальных стволов шахт, оснащенных многоканатным подъемом [14]. В рамках данной работы поставлена задача выполнить имитационное моделирование просыпи шахтного скипа в ПО Rocky DEM для определения нагрузок на клиновой предохранительный полоч. Математическая модель имитационного моделирования разработана для условий ствола «Скиповой»



а – модуль регистрации параметров столкновений частиц; б – опции для экспорта нагрузок

Рис. 3. Настройка модулей для сбора статистики «Boundary Collision Statistics»

Fig. 3. Configuration of modules for collecting "Boundary Collision Statistics" data

Таблица 1. Параметры DEM-модели 1

Table 1. Parameters of DEM model 1

Параметр	DEM - модель 1.1	DEM - модель 1.2	DEM - модель 1.3	DEM - модель 1.4
Высота сброса частиц, м	100	300	500	700
Диаметр вертикального ствола, м	6,5			
Массовый расход частиц, т/сек	2,5			
Время генерирования частиц, сек	20			
Геометрия частиц	Многогранник			
Размер частиц, м	0,30			
Размеры впускного отверстия: высота, мм	840			
ширина, мм	1900			
Угол наклона верхнего ПП, град	0			
Угол наклона нижнего ПП, град	0			

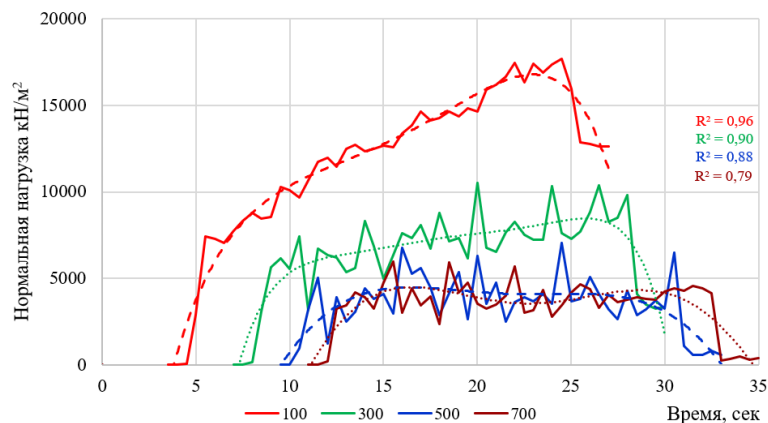


Рис. 4. Нагрузка на верхний предохранительный полоч при угле наклона  $0^\circ$

Fig. 4. Load on the upper protective shelf at  $0^\circ$  inclination angle

шахты «Шерегешская» и предназначена для моделирования соударения просыпи горной массы шахтного скипа 1СН-20 с клиновым предохранительным полком.

#### Основная часть

Геометрическая модель клинового предохранительного полка включает следующие элементы: верхний предохранительный полок (1), нижний предохранительный полок (3), разделительную стенку, соединяющую верхний и нижний полки (2), вертикальный ствол (4) и отбойную нишу (5) (Рис. 1). Принцип работы модели предохранительного полка заключается в следующем: технологическая просыпь, образующаяся при загрузке рудного скипа, либо ее полный объем при аварийной просыпи воздействует на верхнюю часть полка (1), по наклонной отражательной плоскости которой перемещается на нижний полок (3) и далее в отбойную нишу рабочего горизонта (5).

Для генерации частиц (3) с использованием команды «Create Inlet» во вкладке «Geometries» панели инструментов создано отверстие (2) (Рис. 2). Его расположение и скорость генерации

соответствуют параметрам секторного затвора шахтного скипа 1СН-20 в условиях ствола «Скиповой» (1) шахты «Шерегешская» АО «ЕВРАЗ-ЗСМК» [15].

Для экспорта нагрузок, возникающих при соударении частиц с поверхностями верхнего и нижнего предохранительных полков, в ПО Rocky DEM выполнено построение конечно-элементной сетки на поверхностях-мишенях и активированы модули для сбора статистики [16–18]:

– модуль «Boundary Collision Statistics» во вкладке «Modules», предназначенный для регистрации параметров столкновений частиц с CAD-моделью предохранительного полка (Рис. 3, а);

– опции «Forces for FEM Analysis» и «Stress» во вкладке модуля «Boundary Collision Statistics» для экспорта нагрузок, возникающих на наклонных плоскостях верхней и нижней частей предохранительного полка при взаимодействии с частицами (Рис. 3, б).

С целью определения нагрузки на клиновое предохранительный полком рассмотрены DEM-

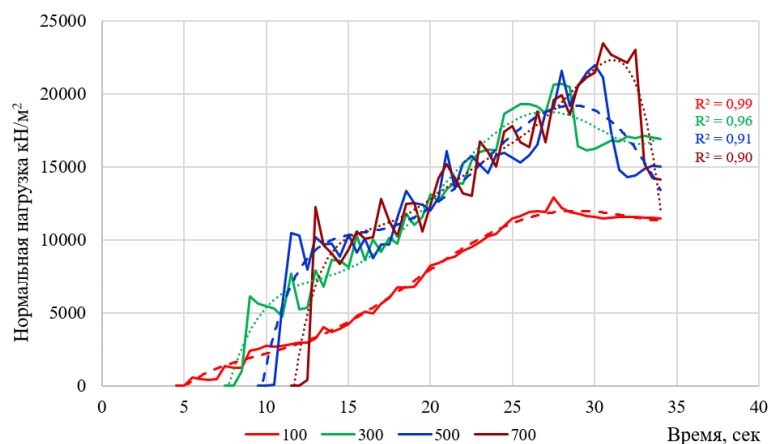


Рис. 5. Нагрузка на нижний предохранительный полком при угле наклона  $0^\circ$

Fig. 5. Load on the lower protective shelf at  $0^\circ$  inclination angle

Таблица 2. Параметры DEM-модели 2

Table 2. Parameters of DEM model 2

Параметр	DEM - модель 2.1	DEM - модель 2.2	DEM - модель 2.3	DEM - модель 2.4
Высота сброса частиц, м	100	300	500	700
Диаметр вертикального ствола, м	6,5			
Массовый расход частиц, т/сек	2,5			
Время генерирования частиц, сек	20			
Геометрия частиц	Многогранник			
Размер частиц, м	0,30			
Размеры впускного отверстия:				
высота, мм	840			
ширина, мм	1900			
Угол наклона верхнего ПП, град	15			
Угол наклона нижнего ПП, град	15			

модели, параметры которых представлены в Таблицах 1–5 и на Рис. 1.

На Рис. 4 представлен график изменения нормальной нагрузки ( $\text{кН/м}^2$ ) на верхний предохранительный полок при угле наклона  $0^\circ$  в зависимости от времени для высот сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м, 700 м.

График позволяет выделить следующие фазы взаимодействия частиц:

- начальная фаза (4-11 с). Характеризуется резким возрастанием нагрузки по мере увеличения числа соударений частиц с поверхностью.

- стационарная фаза (7-13 с). Устанавливается динамическое равновесие, при котором средняя нагрузка остается практически постоянной, а ее колебания обусловлены случайным характером соударений.

- завершающая фаза (24-35 с). Нагрузка снижается вследствие уменьшения плотности потока частиц и прекращения их активного взаимодействия с поверхностью.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 4, показывает, что высота сброса частиц оказывает значительное

влияние на величину нормальной нагрузки.

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет  $17711,67 \text{ кН/м}^2$ .

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка снижается:

- при 300 м нагрузка составляет  $10538,51 \text{ кН/м}^2$ , что на 40,5% ниже, чем при 100 м;

- при 500 м нагрузка составляет  $7044,73 \text{ кН/м}^2$ , что на 33,15% ниже, чем при 300 м;

- при 700 м нагрузка составляет  $6914,73 \text{ кН/м}^2$ , что на 1,84% ниже, чем при 500 м.

Снижение нагрузки связано с рассеиванием частиц в пространстве и уменьшением их энергии при ударе.

На Рис. 5 представлен график изменения нормальной нагрузки ( $\text{кН/м}^2$ ) на нижний предохранительный полок при угле наклона  $0^\circ$  в зависимости от времени при высоте сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м, 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 5, показывает:

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет  $12923,56 \text{ кН/м}^2$ .

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка увеличивается:

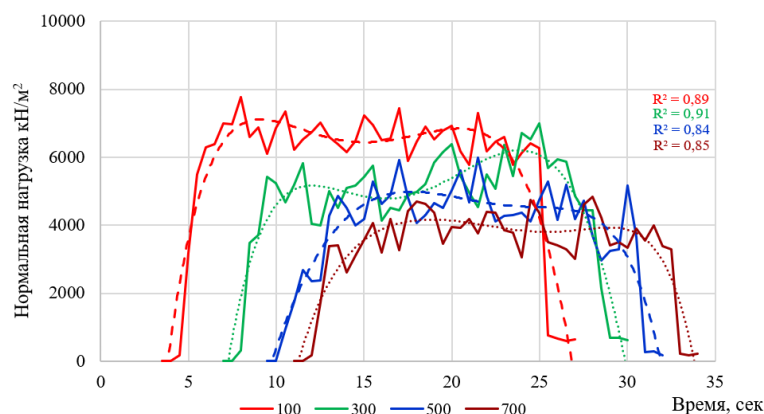


Рис. 6. Нагрузка на верхний предохранительный полок при угле наклона  $15^\circ$   
Fig. 6. Load on the upper protective shelf at  $15^\circ$  inclination angle

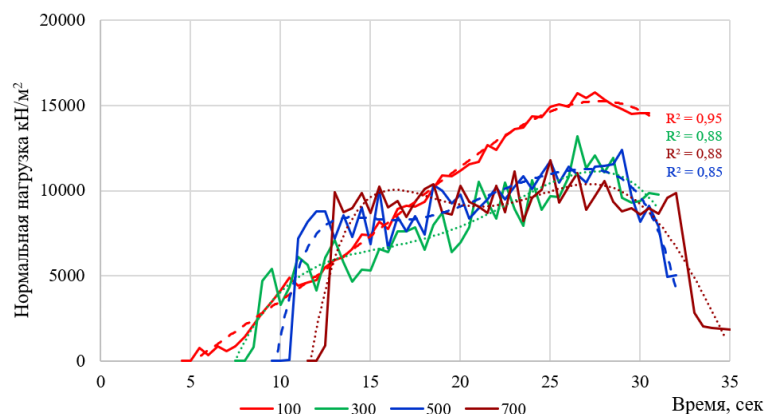


Рис. 7. Нагрузка на нижний предохранительный полок при угле наклона  $15^\circ$   
Fig. 7. Load on the lower protective shelf at  $15^\circ$  inclination angle

– при 300 м нагрузка составляет 20685,06 кН/м<sup>2</sup>, что на 59,9% выше, чем при 100 м;  
 – при 500 м нагрузка составляет 21979,37 кН/м<sup>2</sup>, что на 6,26% выше, чем при 300 м;  
 – при 700 м нагрузка составляет 23485,33 кН/м<sup>2</sup>, что на 6,85% выше, чем при 500 м.

3) Для всех моделей DEM 1.1-1.4 (Таблица 1) характерным является накопление частиц на наклонной плоскости амортизирующего устройства нижнего предохранительного полка.

4) Увеличение нагрузки связано с ростом скорости и энергии частиц при ударе о нижнюю часть ПП.

На Рис. 6 представлен график изменения нормальной нагрузки (кН/м<sup>2</sup>) на верхний предохранительный полоч при угле наклона 15° в зависимости от времени для высот сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м и 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 6, показывает:

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет 7777,65 кН/м<sup>2</sup>.

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка снижается:

– при 300 м нагрузка составляет 6998,88

кН/м<sup>2</sup>, что на 10,0% ниже, чем при 100 м;

– при 500 м нагрузка составляет 5975,79 кН/м<sup>2</sup>, что на 14,6% ниже, чем при 300 м;

– при 700 м нагрузка составляет 4846,01 кН/м<sup>2</sup>, что на 18,9% ниже, чем при 500 м.

3) При высотах сброса 500 м и 700 м наблюдается усиление эффекта снижения нагрузки, что указывает на значительное уменьшение воздействия частиц при больших высотах.

На Рис. 7 представлен график изменения нормальной нагрузки (кН/м<sup>2</sup>) на нижний предохранительный полоч при угле наклона 15° в зависимости от времени при высоте сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м, 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 7, показывает:

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет 15753,79 кН/м<sup>2</sup>.

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка снижается:

– при 300 м нагрузка составляет 13190,68 кН/м<sup>2</sup>, что на 16,3% ниже, чем при 100 м;

– при 500 м нагрузка составляет 12416,39 кН/м<sup>2</sup>, что на 5,9% ниже, чем при 300 м;

Таблица 5. Параметры DEM-модели 5  
 Table 5. Parameters of DEM model 5

Параметр	DEM - модель 3.1	DEM - модель 3.2	DEM - модель 3.3	DEM - модель 3.4
Высота сброса частиц, м	100	300	500	700
Диаметр вертикального ствола, м	6,5			
Массовый расход частиц, т/сек	2,5			
Время генерирования частиц, сек	20			
Геометрия частиц	Многогранник			
Размер частиц, м	0,30			
Размеры впускного отверстия: высота, мм	840			
ширина, мм	1900			
Угол наклона ВПП, град	30			
Угол наклона НПП, град	30			

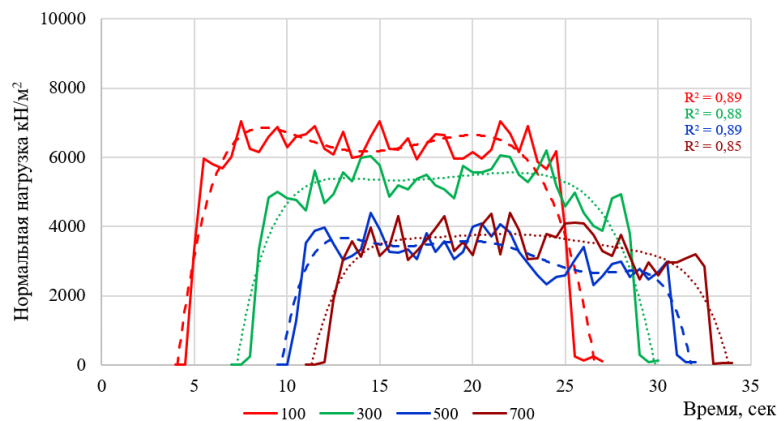


Рис. 8. Нагрузка на верхний предохранительный полоч при угле наклона 30°

Fig. 8. Load on the upper protective shelf at 30° inclination angle

– при 700 м нагрузка составляет 11807,11 кН/м<sup>2</sup>, что на 4,9% ниже, чем при 500 м.

3) При высотах сброса 500 м и 700 м наблюдается замедление снижения нагрузки. Разница в нагрузке между 500 и 700 м составляет 4,9%.

На Рис. 8 представлен график изменения нормальной нагрузки (кН/м<sup>2</sup>) на верхний предохранительный полок при угле наклона 30° в зависимости от времени для высот сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м и 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 8, показывает:

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет 7049,45 кН/м<sup>2</sup>.

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка снижается:

– при 300 м нагрузка составляет 6197,72 кН/м<sup>2</sup>, что на 12,1% ниже, чем при 100 м;

– при 500 м нагрузка составляет 4400,30 кН/м<sup>2</sup>, что на 29,0% ниже, чем при 300 м;

– при 700 м нагрузка составляет 4396,99 кН/м<sup>2</sup>, что на 0,08% ниже, чем при 500 м.

3) При высотах сброса 500 м и 700 м наблюдается стабилизация нагрузки. Разница в нагрузке между 500 и 700 м составляет 0,08%,

что свидетельствует о практически полном отсутствии изменений.

На Рис. 9 представлен график изменения нормальной нагрузки (кН/м<sup>2</sup>) на нижний предохранительный полок при угле наклона 30° в зависимости от времени при высоте сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м, 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 9, показывает:

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет 12105,97 кН/м<sup>2</sup>.

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка изменяется следующим образом:

– при 300 м нагрузка составляет 9238,64 кН/м<sup>2</sup>, что на 23,7% ниже, чем при 100 м;

– при 500 м нагрузка составляет 9823,17 кН/м<sup>2</sup>, что на 6,3% выше, чем при 300 м;

– при 700 м нагрузка составляет 9998,99 кН/м<sup>2</sup>, что на 1,8% выше, чем при 500 м.

3) При высотах сброса 500 м и 700 м наблюдается стабилизация нагрузки. Разница в нагрузке между 500 и 700 м составляет 1,8%, что свидетельствует об отсутствии изменений.

На Рис. 10 представлен график изменения нормальной нагрузки (кН/м<sup>2</sup>) на верхний

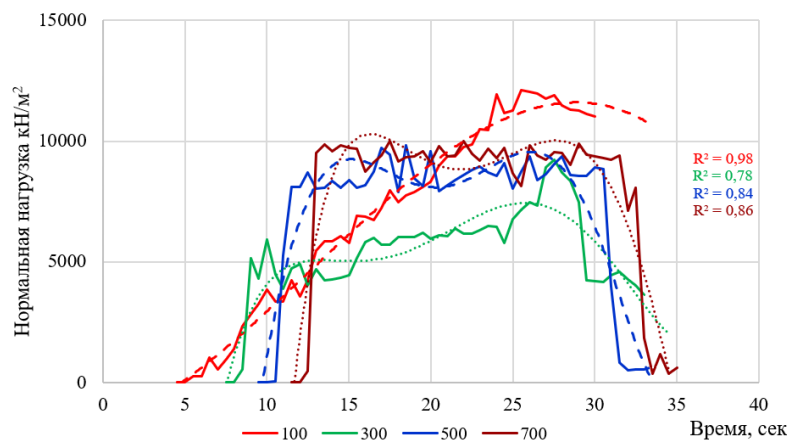


Рис. 9. Нагрузка на нижний предохранительный полок при угле наклона 30°

Fig. 9. Load on the lower protective shelf at 30° inclination angle

Таблица 4. Параметры DEM-модели 4

Table 4. Parameters of DEM model 4

Параметр	DEM - модель 4.1	DEM - модель 4.2	DEM - модель 4.3	DEM - модель 4.4
Высота сброса частиц, м	100	300	500	700
Диаметр вертикального ствола, м	6,5			
Массовый расход частиц, т/сек	2,5			
Время генерирования частиц, сек	20			
Геометрия частиц	Многогранник			
Размер частиц, м	0,30			
Размеры впускного отверстия:				
высота, мм	840			
ширина, мм	1900			
Угол наклона ВПП, град	45			
Угол наклона НПП, град	45			

предохранительный полок при угле наклона 45° в зависимости от времени для высот сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м и 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 10, показывает:

При высоте сброса 100 м нагрузка составляет 5835,59 кН/м<sup>2</sup>.

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка снижается:

– при 300 м нагрузка составляет 4379,54 кН/м<sup>2</sup>, что на 24,9% ниже, чем при 100 м;

– при 500 м нагрузка составляет 3557,86 кН/м<sup>2</sup>, что на 18,8% ниже, чем при 300 м;

– при 700 м нагрузка составляет 3493,68 кН/м<sup>2</sup>, что на 1,9% ниже, чем при 500 м.

При высотах сброса 500 м и 700 м наблюдается стабилизация нагрузки. Разница в нагрузке между 500 и 700 м составляет 1,9%, что

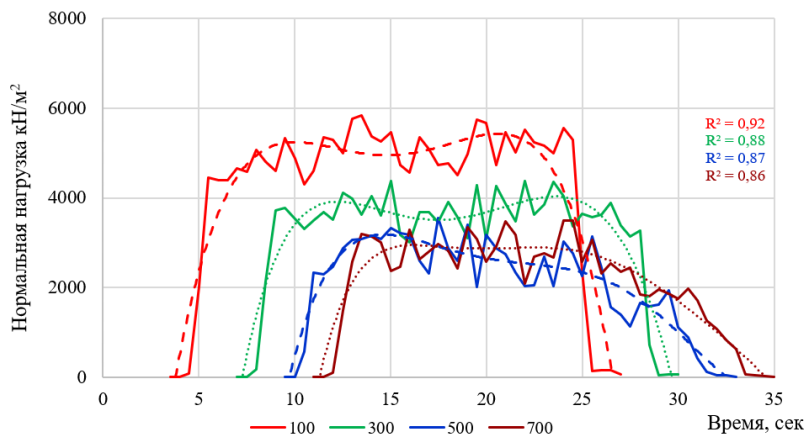


Рис. 10. Нагрузка на верхний предохранительный полок при угле наклона 45°  
Fig. 10. Load on the upper protective shelf at 45° inclination angle

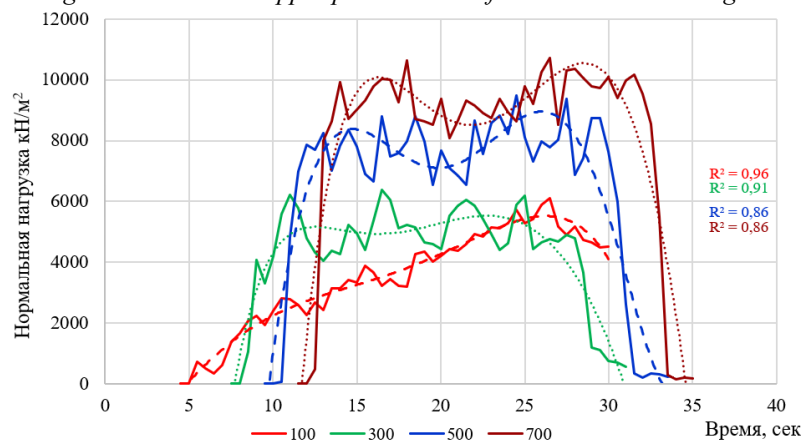


Рис. 11. Нагрузка на нижний предохранительный полок при угле наклона 45°  
Fig. 11. Load on the lower protective shelf at 45° inclination angle

Таблица 5. Параметры DEM-модели 5  
Table 5. Parameters of DEM model 5

Параметр	DEM - модель 5.1	DEM - модель 5.2	DEM - модель 5.3	DEM - модель 5.4
Высота сброса частиц, м	100	300	500	700
Диаметр вертикального ствола, м	6,5			
Массовый расход частиц, т/сек	2,5			
Время генерирования частиц, сек	20			
Геометрия частиц	Многогранник			
Размер частиц, м	0,30			
Размеры впускного отверстия:				
высота, мм	840			
ширина, мм	1900			
Угол наклона ВПП, град	60			
Угол наклона НПП, град	60			

свидетельствует об отсутствии изменений.

На Рис. 11 представлен график изменения нормальной нагрузки ( $\text{кН/м}^2$ ) на нижний предохранительный полок при угле наклона  $45^\circ$  в зависимости от времени при высоте сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м, 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 11, показывает:

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет  $6117,82 \text{ кН/м}^2$ .

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка увеличивается:

– при 300 м нагрузка составляет  $6369,99 \text{ кН/м}^2$ , что на  $4,1\%$  выше, чем при 100 м;

– при 500 м нагрузка составляет  $9490,09 \text{ кН/м}^2$ , что на  $49,0\%$  выше, чем при 300 м;

– при 700 м нагрузка составляет  $10724,18 \text{ кН/м}^2$ , что на  $13,0\%$  выше, чем при 500 м.

3) При высотах сброса 500 м и 700 м наблюдается увеличение нагрузки на  $13,0\%$

На Рис. 12 представлен график изменения нормальной нагрузки ( $\text{кН/м}^2$ ) на верхний предохранительный полок при угле наклона  $60^\circ$

в зависимости от времени для высот сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м и 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 12, показывает:

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет  $4934,78 \text{ кН/м}^2$ .

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка изменяется следующим образом:

– при 300 м нагрузка составляет  $3106,62 \text{ кН/м}^2$ , что на  $37,0\%$  ниже, чем при 100 м;

– при 500 м нагрузка составляет  $2340,75 \text{ кН/м}^2$ , что на  $24,7\%$  ниже, чем при 300 м;

– при 700 м нагрузка составляет  $2670,42 \text{ кН/м}^2$ , что на  $14,1\%$  выше, чем при 500 м.

3) При высотах сброса 500 м и 700 м наблюдается увеличение нагрузки на  $14,1\%$ .

На Рис. 13 представлен график изменения нормальной нагрузки ( $\text{кН/м}^2$ ) на нижний предохранительный полок при угле наклона  $60^\circ$  в зависимости от времени при высоте сброса частиц 100 м, 300 м, 500 м, 700 м.

Анализ графика и числовых данных, представленных на Рис. 13, показывает:

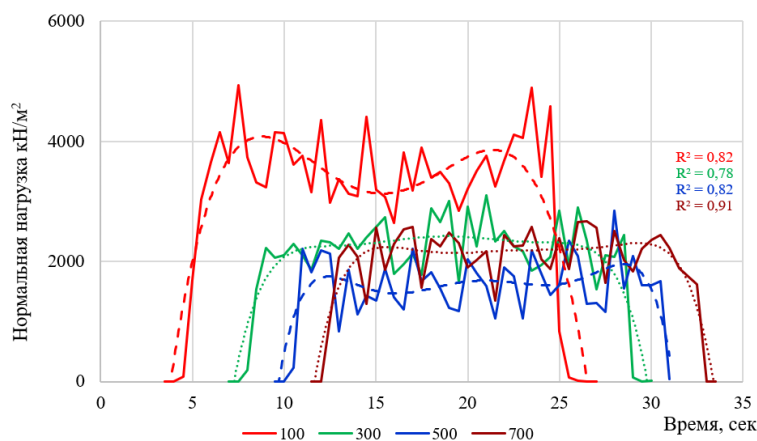


Рис. 12. Нагрузка на верхний предохранительный полок при угле наклона  $60^\circ$

Fig. 12. Load on the upper protective shelf at  $60^\circ$  inclination angle

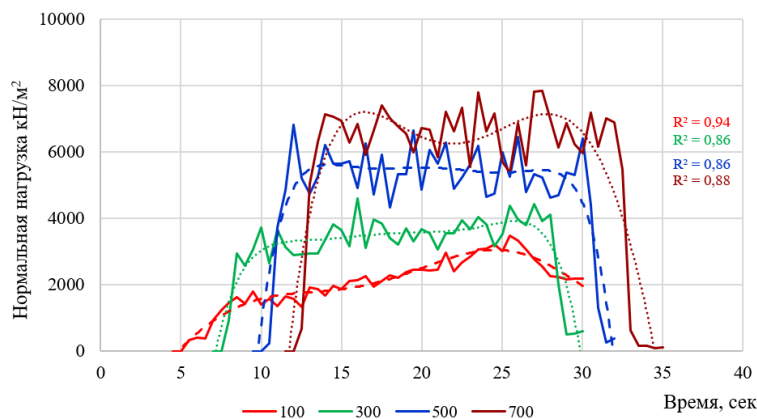


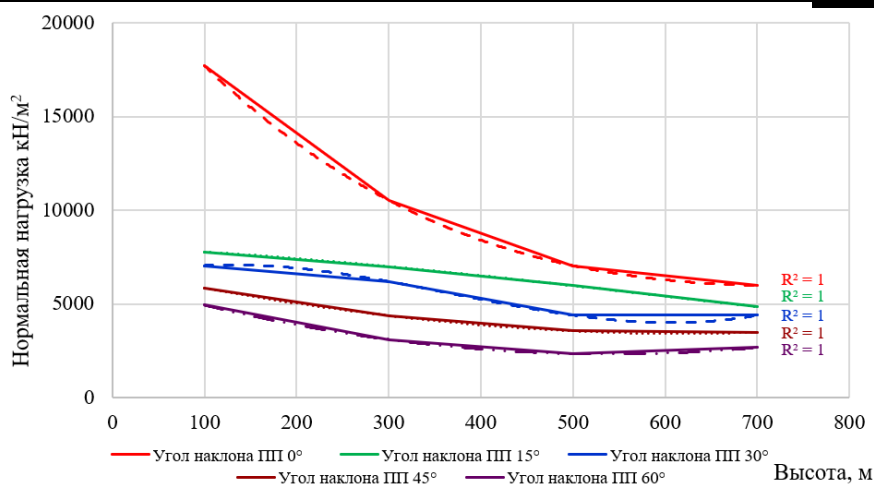
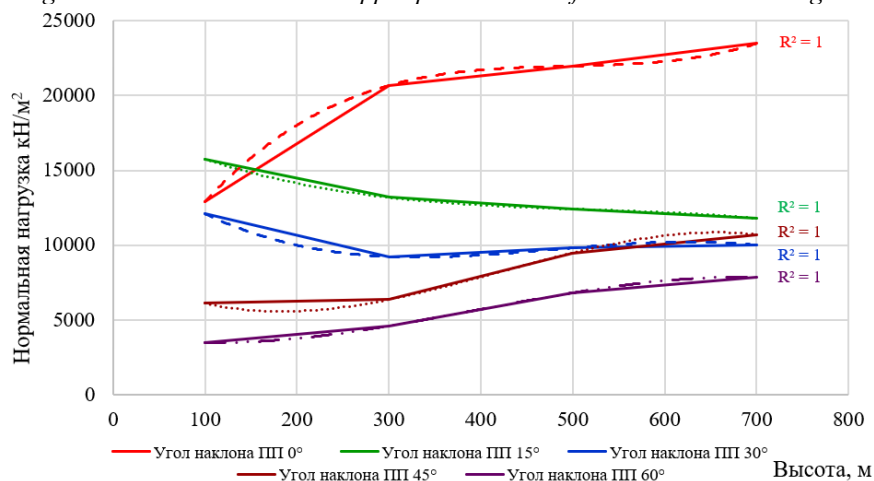
Рис. 13. Нагрузка на нижний предохранительный полок при угле наклона  $60^\circ$

Fig. 13. Load on the lower protective shelf at  $60^\circ$  inclination angle

Таблица 6. Максимальная нагрузка на наклонную плоскость предохранительного полка для DEM-моделей в зависимости от угла наклона и высоты сброса частиц

Table 6. Maximum load on the inclined plane of the protective shelf for DEM models depending on the inclination angle and particle drop height

Угол наклона элемента конструкции ПП	Высота сброса частиц, м			
	100	300	500	700
Верхний ПП 0°, кН/м <sup>2</sup>	17712	10539	7045	5985
Нижний ПП 0°, кН/м <sup>2</sup>	12924	20685	21979	23485
Верхний ПП 15°, кН/м <sup>2</sup>	7778	6999	5976	4846
Нижний ПП 15°, кН/м <sup>2</sup>	15754	13191	12416	11807
Верхний ПП 30°, кН/м <sup>2</sup>	7049	6198	4400	4397
Нижний ПП 30°, кН/м <sup>2</sup>	12106	9239	9823	9999
Верхний ПП 45°, кН/м <sup>2</sup>	5836	4380	3558	3494
Нижний ПП 45°, кН/м <sup>2</sup>	6118	6370	9490	10724
Верхний ПП 60°, кН/м <sup>2</sup>	4935	3107	2341	2670
Нижний ПП 60°, кН/м <sup>2</sup>	3493	4605	6818	7852

Рис. 14. Изменение нагрузки на верхний предохранительный полок в зависимости от угла наклона  
Fig. 14. Load variation on the upper protective shelf versus inclination angleРис. 15. Изменение нагрузки на нижний предохранительный полок в зависимости от угла наклона  
Fig. 15. Load variation on the lower protective shelf versus inclination angle

1) При высоте сброса 100 м нагрузка составляет 3493,36 кН/м<sup>2</sup>.

2) С увеличением высоты сброса (300 м, 500 м, 700 м) нагрузка увеличивается:

– при 300 м нагрузка составляет 4604,57 кН/м<sup>2</sup>, что на 31,8% выше, чем при 100 м;  
– при 500 м нагрузка составляет 6817,82 кН/м<sup>2</sup>, что на 48,1% выше, чем при 300 м;  
– при 700 м нагрузка составляет 7852,49 кН/м<sup>2</sup>, что на 15,2% выше, чем при 500 м.

3) При высотах сброса 500 м и 700 м наблюдается увеличение нагрузки на 15,2%.

В Таблице 6 приведены расчетные значения максимальной нагрузки (пиковых значений) на наклонную плоскость предохранительного полка при изменении угла наклона и высоты сброса частиц.

Экстремальные значения нагрузок выделены жирной рамкой и принимаются в качестве исходных данных для определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкции предохранительного полка. В качестве программного обеспечения будет использоваться отечественная САЕ платформа Fidesys [19].

#### **Заключение**

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1) Высота сброса оказывает существенное влияние на характер нагрузки. Наблюдаемое нелинейное изменение нагрузки во времени свидетельствует о сложной динамике движения частиц, требующей учета как высоты сброса, так и угла наклона отражательной плоскости при проектировании конструкции предохранительного полка.

2) При угле наклона предохранительного полка в диапазоне 30-60° обеспечивается эффективное перераспределение нагрузок на элементы верхнего предохранительного полка и нижнего, что обеспечивает надежность конструкции и снижает риск локальных перегрузок.

3) В пределах диапазона углов наклона отражательной плоскости 30-60° наилучшие конструктивные и эксплуатационные результаты достигаются при углах 30° и 45°.

– угол 45° обеспечивает равномерное распределение нагрузки между верхним и нижним предохранительными полками и должен рассматриваться как базовый для проектных решений.

– угол 30° допустим при наличии конструктивных ограничений по высоте конструкции.

– угол 60° допустим при значительных высотах сброса горной массы и требует обязательной проверки прочности элементов нижнего предохранительного полка с учетом возможных локальных перегрузок.

Полученные параметры модели дискретных элементов служат исходными данными для определения напряжений в элементах

конструкции клинового предохранительного полка в программном комплексе САЕ FIDESYS.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Паланков И. М. Перспективы применения сталебетонной крепи для вертикальных стволов в сложных горно-геологических условиях соляных месторождений // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2010. № 9. С. 43–50. EDN NBMDNR.

2. Плешко М. С., Лобанов Е. А., Муштекенов Т. С., Волков Д. С. Опыт проходки и крепления сверхглубоких горных выработок рудника «Скалистый» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Горный журнал. 2022. № 7. С. 32–37. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.05.

3. Xingdong Zhao, Lei Deng, Xin Zhou, Yifan Zhao, Zhenpeng Guo. A Primary Support Design for Deep Shaft Construction Based on the Mechanism of Advanced Sequential Geopressure Release // Processes. 2022. № 10. 1376. DOI: 10.3390/pr10071376.

4. Волков П. В., Пыталев И. А., Струков К. И., Кульсаитов Р. В., Бикбов Р. И. Технологические решения и конструкции предохранительных устройств при углубке шахтных стволов. Маркшейдерия и недропользование. 2025. № 25(4). С. 65–70. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-4-65-70.

5. Гылымұлы С., Тиагалиева Ж. А., Белянкина О. В. [и др.] Разработка имитационной модели торможения шахтной подъемной установки в системе Matlab // Уголь. 2022. № 10. С. 50–54. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-50-54. EDN: EUMZXM

6. Панкратенко А. Н., Машин А. Н., Насонов А. А., Паринов Д. С. Особенности оценки технического состояния шахтных стволов с большим сроком эксплуатации // Горный журнал 2023. № 1. С. 20–26.

7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: издательство официальное: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г. № 507: зарегистрировано в министерстве юстиции Российской Федерации 18 декабря 2020 г. № 61587: дата введения 01 января 2021 г. Москва: ЦЕНТРМАГ, 2021. 156 с. ISBN 978-5-903060-68-9. Текст: непосредственный.

8. Горбунов Б. Ф. Опыт применения предохранительных устройств для углубки вертикальных стволов: Обзорная информация / ЦНИЭИуголь, ЦБНТИ Минуглепрома УССР. Москва, 1984. 33 с.

9. Першин В. В. Реконструкция, ремонт, восстановление и ликвидация горных выработок. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет Т. Ф.

Горбачева. Кемерово, 2021. 520 с.

10. Инструкция по расчету, сооружению и ликвидации предохранительных устройств для углубки вертикальных стволов шахт / ВНИИОМШС. Харьков, 1979. 91 с.

11. Временная инструкция по защите забоев вертикальных стволов шахт / Минчермет СССР; ВО «Союзшахтопроходка»; МВССО УССР, Криворожский горный институт. Кривой рог, 1985. 104 с.

12. Определение вероятных нагрузок и разработка эффективных способов защиты забоев углубляемых стволов шахт для условий Горной Шории : Отчет о НИР / КГРИ; А. М. Задорожний. Руководитель № ГР68053180. Кривой Рог, 1983. 200 с.

13. Шутько Ю. П., Морозов А. Е., Мордухович В. Д. Углубка вертикальных стволов шахт. Москва : Недра, 1978. 277 с.

14. Аксенов В. В., Копытов А. И., Вети А. А. Разработка схемных решений предохранительных полков при углубке вертикальных стволов шахт, оснащенных многоканатным скиповым подъемом // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 25-26 апреля 2024 года. Прокопьевск : Кузбасский государственный

технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2024. С 17–24.

15. Копытов А. И., Куркин А. О. Армирование ствола «Скиповой» при реконструкции Горно-Шорского филиала ОАО «Евразруда». Кемерово : Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2014. № 6. С. 47–50.

16. Дубинкин Д. М., Ялышев А. В. Определение рациональной сетки поверхностей для моделирования горного оборудования в среде DEM // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3(179). С. 61–68. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-61-68. EDN: TURLMI.

17. Yan Y., Helmons R., Schott D. Pin-on-Disc Modelling with Mesh Deformation Using Discrete Element Method // Materials. 2022. № 15. 1813. DOI: 10.3390/ma15051813.

18. Zhan L., Peng C., Zhang B., Wu W. A surface mesh represented discrete element method (SMRDEM) for particles of arbitrary shape // Powder Technology. 2021. Vol. 377. Pp. 760–779. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.046.

19. Дубинкин Д. М., Ялышев А. В., Соннов М. А. Оценка конструкции козырька самосвала посредством виртуального испытания FOPS в CAE Fidesys. Горная промышленность. 2025. № 5. С. 64–68. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5-64-68.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Аксенов Владимир Валерьевич**, докт. техн. наук, ФИЦ УУХ СО РАН, e-mail: 55vva42@mail.ru

**Копытов Александр Иванович**, докт. техн. наук, профессор кафедры РМПИ, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: L01BDV@yandex.ru

**Пашков Дмитрий Алексеевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НЦЦТ, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

**Вети Ахмед Аиманович**, горный инженер, научный сотрудник (Научно-исследовательская лаборатория цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева; 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28). Ведущий технолог ГМК и ПВВ (ЗСФ ООО «АЗОТ МАЙНИНГ СЕРВИС» 653035, Россия, Кузбасс, г. Прокопьевск, ул. Пионерская, 15), e-mail: wetti\_a@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

**Аксенов Владимир Валерьевич** – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы.

**Копытов Александр Иванович** – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования.

**Пашков Дмитрий Алексеевич** – научный менеджмент, концептуализация исследования, написание текста, сбор и анализ данных, выводы.

**Вети Ахмед Аиманович** – научный менеджмент, концептуализация исследования, написание текста, сбор и анализ данных, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

## SIMULATION OF MINE SKIP SPILLAGE IN ROCKY DEM FOR LOAD DETERMINATION ON A WEDGE-TYPE PROTECTIVE SHELF

Vladimir V. Aksenov<sup>1</sup>, Aleksandr I. Kopytov<sup>2</sup>,  
Dmitriy A. Pashkov<sup>2</sup>, Akhmed A. Wetti<sup>2,3</sup><sup>1</sup> Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences<sup>2</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University<sup>3</sup> West Siberian Branch of Azot Mining Service LLC

\* for correspondence: 55vva42@mail.ru



## Article info

Received:

24 December 2025

Accepted for publication:

15 January 2026

Accepted:

12 February 2026

Published:

25 June 2026

**Keywords:** Vertical shaft, skip hoist, wedge-type protective shelf, emergency spillage, magnetite ore, DEM

**Abstract.**

During the reconstruction of mining enterprises, an essential task is to combine the deepening of a vertical shaft with the operation of the production hoist, which transports the mined rock to the surface. Shaft deepening is a critical stage of reconstruction, as further mine development and preparatory works on the lower levels, providing access to new mineral reserves, become possible only after its completion. Under these conditions, the safety of shaft workers is ensured by protective shelves that absorb impact loads from technological rock spillage generated during loading-system operation or accidental skip self-dumping. Existing methods for determining impact loads on protective shelves rely primarily on empirical dependencies that include numerous difficult-to-define coefficients. This limits calculation accuracy and reduces applicability in contemporary engineering practice. Improving the reliability of load assessment requires the adoption of mathematical modeling and modern numerical methods. This study performs simulation of rock spillage impact using the discrete element method in the Rocky DEM software to determine the parameters of contact loads acting on a wedge-type protective shelf. The obtained results serve as input data for stress-strain analysis of structural elements in the CAE Fidesys environment. The application of this integrated approach enhances the accuracy of calculations and supports the justification of design parameters for the wedge-type protective shelf.

**For citation:** Aksenov V.V., Kopytov A.I., Pashkov D.A., Wetti A.A. Simulation of mine skip spillage in Rocky DEM for load determination on a wedge-type protective shelf. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):144-157. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-144-157, EDN: FZEGSI

## REFERENCES

- Palankoev I.M. Perspektivy primeneniya stalebetonnoy krepki dlya vertikal'nykh stvolov v slozhnykh gomo- geologicheskikh usloviyakh solyanykh mestorozhdenij. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2010; 9:43–50. EDN NBMDNR.
- Pleshko M.S., Lobanov E.A., Mushtekenov T.S., Volkov D.S. Opyt prohodki i krepneniya sverhglubokikh gomyh vyrabotok rudnika «Skalistsy» ZF PAO «GMK «Noril'skiy nikel'». *Gornyy zhurnal*. 2022; 7:32–37. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.05.
- Xingdong Zhao, Lei Deng, Xin Zhou, Yifan Zhao, Zhenpeng Guo. A Primary Support Design for Deep Shaft Construction Based on the Mechanism of Advanced Sequential Geopressure Release. *Processes*. 2022; 10:1376. DOI: 10.3390/pr10071376.
- Volkov P.V., Pytalev I.A., Strukov K.I., Kul'saitov R.V., Bikbov R.I. Tekhnologicheskie resheniya i konstrukcii predohranitel'nykh ustrojstv pri uglubke shahtnykh stvolov. *Markshejderiya i nedropol'zovanie*. 2025; 25(4):65–70. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-4-65-70.
- Gylymuly S., Tiagalieva Zh.A., Belyankina O.V. [i dr.] Razrabotka imitacionnoj modeli tormozheniya shahtnoj pod"emnoj ustanovki v sisteme Matlab. *Ugol'*. 2022; 10:50–54. -DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-50-54. EDN: EUMZXM.
- Pankratenko A.N., Mashin A.N., Nasonov A.A., Parinov D.S. Osobennosti ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya shahtnykh stvolov s bol'shim srokom ekspluatatsii. *Gornyy zhurnal*. 2023; 1:20–26.
- Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shahtah» : izdatel'stvo oficial'noe : utverzhdeny prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 8 dekabrya 2020 g. № 507 : zaregistrirvano v ministerstve yustitsii Rossijskoj Federacii

18 dekabrya 2020 g. № 61587 : data vvedeniya 01 yanvarya 2021 g. Moskva: CENTRMAG; 2021. 156 s. ISBN 978-5-903060-68-9. Tekst : neposredstvennyj.

8. Gorbunov B.F. Opyt primeneniya predohranitel'nyh ustrojstv dlya uglubki vertikal'nyh stvolov: Ob-zomaya informaciya / CNIElugol', CBNTI Minugleproma USSR. Moskva, 1984. 33 s.

9. Pershin V.V. Rekonstrukciya, remont, vosstanovlenie i likvidaciya gornyh vyrabotok. Ministerstvo nauki i vysshogo obrazovaniya Rossijskoj Federacii, Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet T.F. Gorbacheva. Kemerovo, 2021. 520 s.

10. Instrukciya po raschetu, sooruzheniyu i likvidacii predohranitel'nyh ustrojstv dlya uglubki vertikal'nyh stvolov shaht / VNIOMSHS. Har'kov, 1979. 91 s.

11. Vremennaya instrukciya po zashchite zaboev vertikal'nyh stvolov shaht / Minchermet SSSR; VO «So-yuzshahtoprohodka»; MVSSO USSR, Krivorozhskij gornyj institut. Krivoj rog, 1985 104 s.

12. Opredelenie veroyatnyh nagruzok i razrabotka effektivnyh sposobov zashchity zaboev uglublyaemyh stvolov shaht dlya uslovij Gornoj Shorii: Otchet o NIR / KGRI; A.M. Zadorozhnyj. Rukovoditel' № GR68053180. Krivoj Rog, 1983. 200 s.

13. Shut'ko Yu.P., Morozov A.E., Morduhovich V.D. Uglubka vertikal'nyh stvolov shaht. Moskva: Nedra; 1978. 277 s.

14. Aksenov V.V., Kopytov A.I., Veti A.A. Razrabotka skhemnyh reshenij predohranitel'nyh polkov pri uglubke

vertikal'nyh stvolov shaht, osnashchennyh mnogokanatnym skipovym pod'emom // Perspektivy innovacionnogo razvitiya ugol'nyh regionov Rossii: Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Prokop'evsk, 25-26 aprelya 2024goda. Prokop'evsk: Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. T.F. Gorbacheva; 2024. S.17–24.

15. Kopytov A.I., Kurkin A.O. Armirovanie stvola «Skipovoj» pri rekonstrukcii Gomo-Shorskogo filiala OAO «Evrazruda». Kemerovo: Vestnik KuzGTU; 2014; 6:47–50.

16. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. Opredelenie racional'noj setki poverhnostej dlya modelirovaniya gomogo oborudovaniya v srede DEM. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2025; 3(179):61–68. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-61-68. EDN: TURLMI.

17. Yan Y., Helmons R., Schott D. Pin-on-Disc Modelling with Mesh Deformation Using Discrete Element Method. *Materials*. 2022; 15:1813. DOI: 10.3390/ma15051813.

18. Zhan L., Peng C., Zhang B., Wu W. A surface mesh represented discrete element method (SMRDEM) for particles of arbitrary shape. *Powder Technology*. 2021; 377:760–779. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.046.

19. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V., Sonnov M.A. Ocenka konstrukcii kozyr'ka samosvala posredstvom virtual'nogo ispytaniya FOPS v CAE Fidesys. *Gornaya promyshlennost'*. 2025; 5:64–68. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5-64-68

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).  
The authors declare no conflict of interest.

#### About the authors:

**Vladimir V. Aksenov**, doctor of technical sciences, Institute of coal, Federal research center for coal and coal chemistry, Siberian branch of the Russian academy of sciences, e-mail: 55vva42@mail.ru

**Alexander I. Kopytov**, doctor of technical sciences, professor of the department of RMPI, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), e-mail: L01BDV@yandex.ru

**Dmitry A. Pashkov**, candidate of technical sciences, Senior Researcher, Kemerovo, Russian Federation, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

**Ahmed A. Wetti**, mining engineer, researcher (Research Laboratory for Digital Transformation of Mineral and Raw Materials Complex Enterprises, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28). Lead Technologist, GKK and PVV ZSF, AZOT MINING SERVICE LLC (653035, Russia, Kuzbass, Prokopyevsk, Pionerskaya Street, 15), e-mail: wetti\_a@mail.ru

#### Contribution of the authors:

Vladimir V. Aksenov – research task formulation, scientific management, research conceptualization, conclusions.

Alexander I. Kopytov – research task formulation, scientific management, research conceptualization.

Dmitry A. Pashkov – scientific management, research conceptualization, data collection and analysis, writing, conclusions.

Ahmed A. Wetti – scientific management, research conceptualization, data collection and analysis, writing, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

