

## Определение статических нагрузок на борт грузовой платформы карьерного самосвала

Д.М. Дубинкин✉, А.В. Ялышев

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация  
✉ ddm.tm@kuzstu.ru

**Резюме:** Рассмотрены расчетные схемы определения статических нагрузок на борт грузовой платформы карьерного самосвала. Описаны методы определения статических нагрузок. Проведены расчеты аналитическим методом давления на подпорную стенку. Выполнено имитационное моделирование нагружения борта методом дискретных элементов с использованием программного обеспечения Rocky DEM. Приведены параметры для дискретных элементов (сыпучего материала – угля). Проанализированы расчетные значения и полученные ранее значения физических испытаний и исследований. Получены графики и зависимости влияния высоты стенки борта на давление подпорной стенки. Приведены рекомендации по определению активного давления на борт грузовой платформы карьерного самосвала.

**Ключевые слова:** карьерные самосвалы, грузовая платформа, кузов самосвала, подпорная стена, боковое давление, коэффициент бокового давления, физико-механические свойства грунта, методы расчета давления на ограждение

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. № 075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

**Для цитирования:** Дубинкин Д.М., Ялышев А.В. Определение статических нагрузок на борт грузовой платформы карьерного самосвала. *Горная промышленность*. 2022;(6):137–144. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-137-144>

## Determination of static loads on the body sides of a mining dump truck

D.M. Dubinkin✉, A.V. Yalyshev

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation  
✉ ddm.tm@kuzstu.ru

**Abstract:** The article considers design schemes for determining static loads on the body sides of a mining dump truck. Methods for determining the static loads are described. Calculations of the pressure on the retaining wall using an analytical method were carried out. Simulation modeling of the body side loading with the method of discrete elements using the Rocky DEM software was performed. The parameters for discrete elements (with coal as the bulk material) are given. The calculated values and the previously obtained values of physical tests and studies are analyzed. Graphs and dependences of the influence of the body side height on the pressure on the retaining wall are obtained. Recommendations are given for determining the active pressure on the body side of a mining dump truck.

**Keywords:** mining dump trucks, loading platform, dump truck body, retaining wall, lateral pressure, lateral pressure coefficient, physical and mechanical properties of the soil, methods for calculating the pressure on enclosing structures

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement No. 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle: “Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life” (the “Clean Coal – Green Kuzbass” Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project “Development and creation of an unmanned shuttle-type mine truck with a payload of 220 tonnes” in terms of research, development and experimental-design work.

**For citation:** Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. Determination of static loads on the body sides of a mining dump truck. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):137–144. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-137-144>

**Введение**

В настоящий момент на открытых горных работах перевозки занимают значительную часть цикла добычи полезных ископаемых, в большинстве случаев в карьере применяются карьерные самосвалы (КС). Эффективность транспортирования горной массы зависит от оптимального выбора грузовой платформы (ГП) и ее схемных решений конструкции [1–2]. При проектировании ГП необходимо учитывать ряд факторов, среди которых одним из важных является тип перевозимого материала. Существует ряд работ [3–5], направленных на улучшение конструкции ГП, но в них нет единого, обоснованного, подхода к получению статических нагрузок на ГП.

Определение действия статических нагрузок на ГП – это важнейший этап для создания оптимальных и обоснованных конструкций ГП. Основные статические нагрузки на ГП оказывает перевозимый материал, для определения этих нагрузок разработаны различные теории. В работе «Механика грунтов» [6] описано многообразие подходов определения действия сил и нагрузок, которое объясняется сложным и многообразным взаимодействием насыпного материала и твердых поверхностей. Ввиду особенностей расчетных методов и учитывая различные факторы, зачастую расчетная и реальная перевозимая горная масса, а также объем, могут отличаться. В настоящее время существует множество инструментов и численных методов расчета статических нагрузок, действующих на борт ГП КС, например, метод дискретных элементов (DEM) [7–8], однако использование только данного метода недостаточно для решения задачи оптимизации ГП, необходимо разработать комплексный подход с учетом особенностей перевозимой горной массы.

Исходя из вышесказанного поставлена цель работы: оценить методы расчетов статических нагрузок, действующих на борт ГП КС.

**Расчетные схемы определения статических нагрузок на борт грузовой платформы карьерного самосвала**

Рассмотрим борт ГП КС как подпорную стенку, удерживающую массив перевозимого материала от обрушения, в аналитическом и дискретном методах. В качестве перевозимого материала выбран уголь. Сыпучий материал (уголь) загружается в ГП КС согласно паспортам загрузки, составленным в соответствии с наибольшим использованием полезного объема. Загрузка угля ведется погрузочным оборудованием (фронтальными погрузчиками, экскаваторами). Уголь под действием собственного веса образует насыпь с углом, равным или близким к углу естественного откоса.

**Аналитический метод**

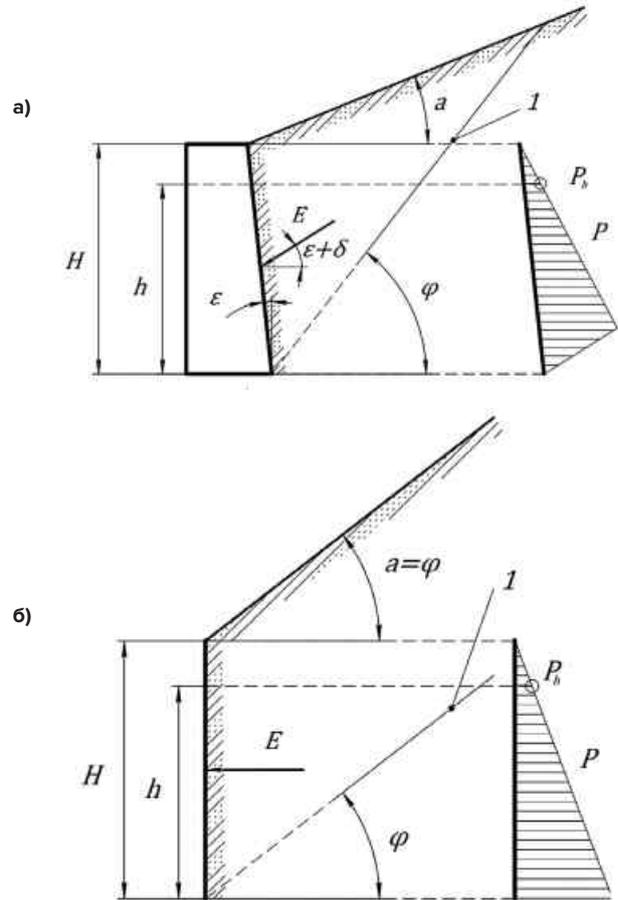
Определение нагрузок, действующих на борт ГП КС, аналитическим методом аналогично задачам механики грунтов. Существует множество способов получения эпюры давления на подпорную стенку, в основе которых лежит метод Мора-Кулона [9–10]. Данный метод широко используется в строительстве и горном деле применительно к рыхлым несвязным и связным грунтам, применяется также в аналитическом методе.

Сравним расчетные схемы давления на подпорную стенку общего случая с рассматриваемым (рис. 1). На рис. 1:  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $a$  – угол, под которым располагается насыпь;  $\varepsilon$  – угол отклонения стенки от вертикали;  $\rho$  – угол трения насыпного материала об стенку;  $E$  – равнодействующая давления грунта;  $H$  – высота стенки, борта;

$h$  – высота точки, измеренная от основания для определения давления;  $P$  – давление.

Анализ расчетных схем давления на подпорную стенку (см. рис. 1, б) показывает, что загрузка сыпучим материалом в ГП КС представляет собой частный случай давления несвязного грунта на подпорную стенку, в котором угол засыпки равен углу откоса, то есть равен углу внутреннего трения  $a = \varphi$ .

а б



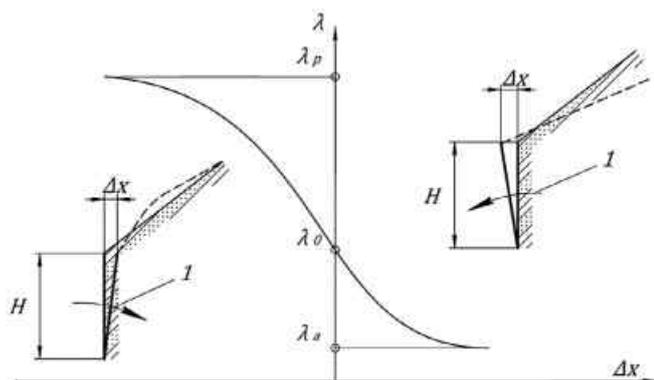
**Рис. 1**  
Расчетная схема давления на подпорную стенку:  
а – общий случай;  
б – рассматриваемый случай  
1 – линия внутреннего трения

**Fig. 1**  
Computational model for the pressure on the retaining wall:  
a – a general case;  
b – the case under consideration  
1 – line of internal friction

Аналитический метод (рис. 2) позволяет получать давление на подпорную стенку в трех состояниях: в состоянии активного давления грунта; в состоянии покоя; в состоянии пассивного давления грунта.

Анализ зависимости коэффициента бокового давления  $\lambda$  от горизонтальных перемещений конструкции  $\Delta X$  (рис. 2) показывает, что активное давление всегда меньше пассивного, а пассивное всегда больше давления в состоянии покоя.

Расчеты подпорных стен на практике ведутся для состояния активного давления, что предполагает обязательное смещение ограждения (стенки). Однако, когда ограждающая конструкция достаточно устойчива для смещений или изгибов, то из графика следует, что оказываемое грунтом давление будет больше активного и близко к давлению состоянию покоя.



**Рис. 2**  
Зависимость коэффициента бокового давления от горизонтальных перемещений конструкции: 1 – направление движения стенки

**Fig. 2**  
Dependence of the lateral pressure coefficient on horizontal movements of the structure: 1 – direction of the wall movement

Для ГП КС могут быть применимы два состояния: состояние покоя и активного давления грунта:

1. В состоянии покоя давление грунта на высоте  $h$ , м, определяется через расчетный коэффициент бокового давления  $\lambda_0$  и насыпную плотность материала. В рассматриваемом случае и согласно заданной форме засыпки сыпучим материалом (см. рис. 1, б) зависимость давления линейная, максимальное давление возникает у основания стенки  $h = H$ . Давление  $P_0$ , т/м<sup>2</sup>, в состоянии покоя определяется по формуле:

$$P_0 = \gamma \cdot h \cdot \lambda_0.$$

Коэффициент бокового давления  $\lambda_0$  в состоянии покоя определяется по формуле:

$$\lambda_0 = \frac{v \cdot (1 + \sin a)}{1 - v},$$

где  $v$  – коэффициент Пуассона.

Рассчитаем давление в состоянии покоя в основании подпорной стенки для построения эпюры:

$$\lambda_0 = \frac{v(1 + \sin a)}{1 - v} = 0,796;$$

$$P_0 = 0,85 \cdot 1 \cdot 0,796 = 0,68 \text{ т/м}^2.$$

2. Активное давление грунта на высоте  $h$ , м, определяется через расчетный коэффициент бокового давления  $\lambda_a$  и насыпную плотность материала. Давление на подпорную стенку определяется в момент, когда подпорная стенка начинает перемещаться в сторону от грунта, и в данном случае перемещения принимаются бесконечно малыми. В момент предельного равновесия давление сыпучего материала на подпорную стенку достигает наибольшего значения. Активное давление  $P_a$ , т/м<sup>2</sup>, определяется по формуле:

$$P_a = \gamma \cdot h \cdot \lambda_a.$$

Коэффициент активного бокового давления  $\lambda_a$  от горизонтальных перемещений конструкции  $\Delta x$  определяется по формуле:

$$\lambda_a = \left( \frac{\cos(\varphi - a)}{\cos a \left( 1 + \frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi + \rho)}{\cos(a + \delta) \cdot \cos(a - \rho)} \right)} \right)^2.$$

Для рассматриваемого случая формула упрощается до следующего вида:

$$\lambda_a = \cos(\varphi)^2.$$

Рассчитаем активное давление в основании подпорной стенки для построения эпюры:

$$P_a = 0,85 \cdot 1 \cdot 0,62 = 0,53 \text{ т/м}^2.$$

Анализ рассматриваемых аналитических методов показал, что они не учитывают точную форму поверхности засыпки и гранулометрический состав сыпучего материала, а также весьма ограничены к применению для сложных форм поверхностей.

Существуют и другие методы расчета [11–13], в которых учитываются эффект сводообразования в грунте, форма засыпки и т.п. Однако эти методы основаны на методе сплошной среды.

### Метод дискретных элементов

Методы дискретных элементов (МДЭ) основаны на имитационном моделировании движения сыпучего материала как отдельных частиц [14–15].

Имитационное моделирование МДЭ выполнялось с использованием программного обеспечения Rocky DEM. В качестве сыпучего материала выбран уголь. Используемые в имитационном моделировании характеристики угля представлены в табл. 1, 2 и 3. Характеристики материалов, коэффициенты и параметры взаимодействия были приняты в соответствии с рекомендациями справочной литературы и исследований [16–19] с целью приближения к реальным условиям эксплуатации. Имитационное моделирование МДЭ производилось с дополнительными факторами, а именно учитывались геометрическая форма поверхности засыпки и гранулометрический состав сыпучего материала.

**Таблица 1**  
Характеристики сыпучего материала

Показатель	Уголь
Насыпная плотность, т/м <sup>3</sup>	0,85
Модуль упругости (Юнга), ГПа	1,00
Коэффициент Пуассона	0,30

**Table 1**  
Characteristics of the bulk material

**Таблица 2**  
Гранулометрический состав сыпучего материала

Точка замера	Выход, %		
	Размер фракции, мм		
	-100	-200	250
Кузов автосамосвала (до транспортирования)	60,7	78,8	21,2

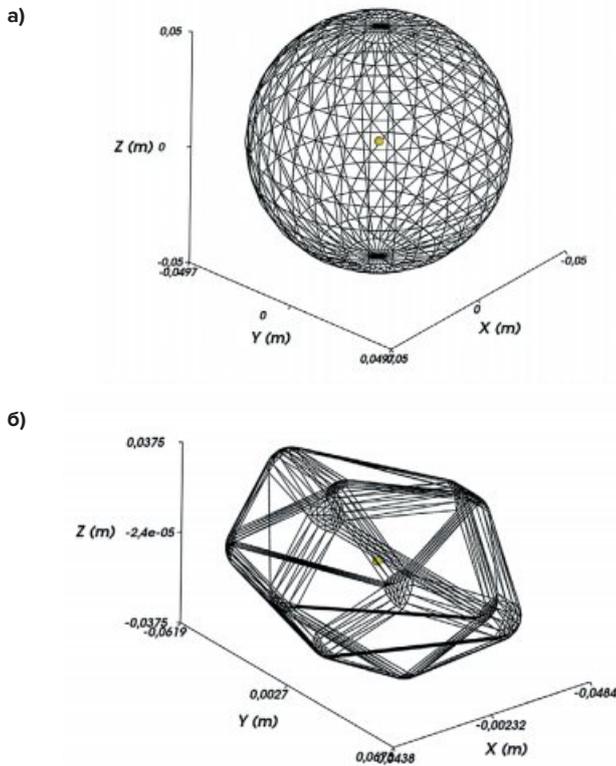
**Table 2**  
Particle size distribution of the bulk material

**Таблица 3**  
Характеристики, отражающие показатели взаимодействия частиц и поверхностей

Показатель коэффициентов	Уголь/Сталь	Уголь/Уголь
Трение покоя $f_{\text{покоя}}$	0,4	0,56
Трение движения $f_{\text{движ}}$	0,3	0,56
Восстановления при ударе E	0,3	0,30

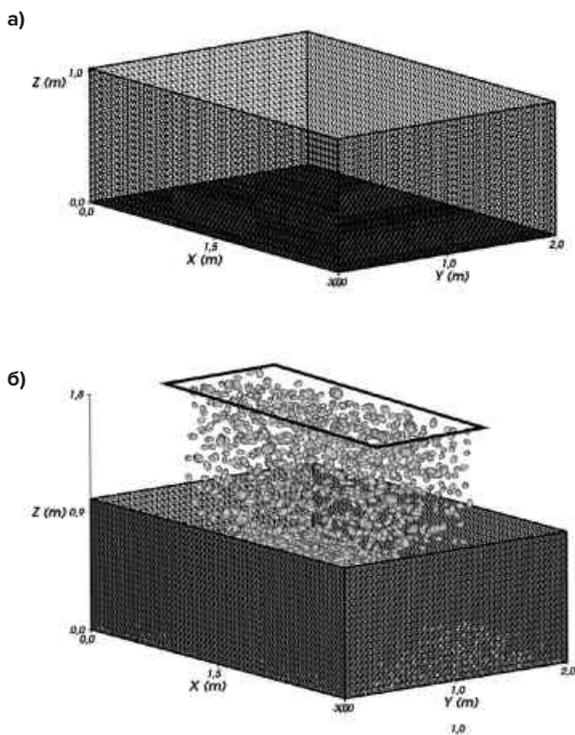
**Table 3**  
Characteristics reflecting the interaction of particles and surfaces

В имитационном моделировании МДЭ использовались формы частиц сыпучего материала в виде сферы  $s1-s4$  (рис. 3, а) и полигидрона  $p1-p4$  (рис. 3, б), с количеством полигонов равным 8 и закругленными углами.



**Рис. 3**  
Форма частиц:  
а – в виде сферы  $s1-s4$ ;  
б – в виде полигидрона  $p1-p4$

**Fig. 3**  
article shapes:  
а – spherical  $s1-s4$ ;  
б – polyhedron  $p1-p4$



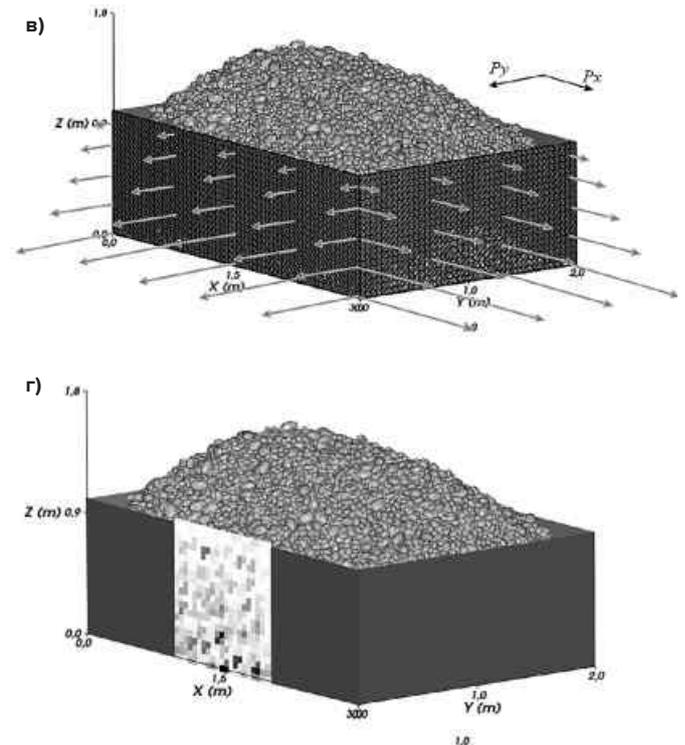
**Рис. 4**  
Этапы моделирования загрузки сыпучего материала в грузонесущую емкость

В качестве грузонесущей емкости для всех расчетов используется тонкостенный прямоугольный короб высотой 1 м, длиной 3 м и шириной 2 м. Квадрат полигональной сетки имеет размеры  $50 \times 50$  мм. Моделируемые частицы находятся в поле постоянно действующего ускорения свободного падения ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ) вдоль оси  $z$ , с расчетным шагом 0,05 с. Процесс имитационного моделирования происходил следующим образом:

- в статичную грузонесущую емкость (рис. 4, а) загружается равномерно сыпучий материал;
- частицы сыпучего материала появляются со случайной ориентацией и случайным образом в пределах заданной плоскости (рис. 4, б);
- процесс загрузки грузонесущей емкости происходил в течение 18 с с интенсивностью 330 кг/с. Данные показатели были выбраны исходя расчетного объема грузонесущей емкости;
- сыпучий материал заполнял грузонесущую емкость до образования шапки;
- по результатам загрузки сыпучего материала в грузонесущую емкость определялось давление на подпорную стенку (рис. 4, в, г).

Угол откоса шапки, сформировавшийся после имитационного моделирования (рис. 5), совпадает со справочными данными, что свидетельствует о сходимости выбранных параметров для исследуемых форм частиц. Полученная геометрия шапки у вершины насыпи (см. рис. 5) образуется и в реальных условиях эксплуатации ГП КС, которая зависит от гранулометрического состава и формы частиц сыпучего материала.

Моделирование проводилось 4 раза для разных форм частиц  $s1-s4$  и  $p1-p4$  с целью повышения точности полученных числовых значений давления. Для качественного анализа результатов моделирования применялись методы статистической обработки результатов измерений.



**Fig. 4**  
Stages of modeling the loading process of bulk material into the load carrier

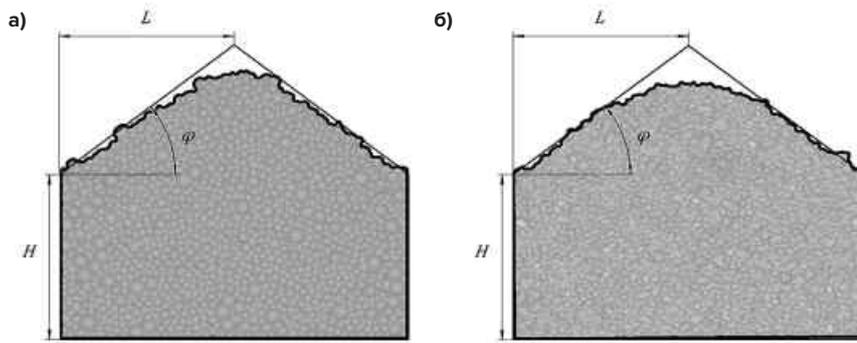


Рис. 5  
Угол естественного откоса:  
а – s1-s4; б – p1-p4

Fig. 5  
Angle of natural slope:  
а – s1-s4; б – p1-p4

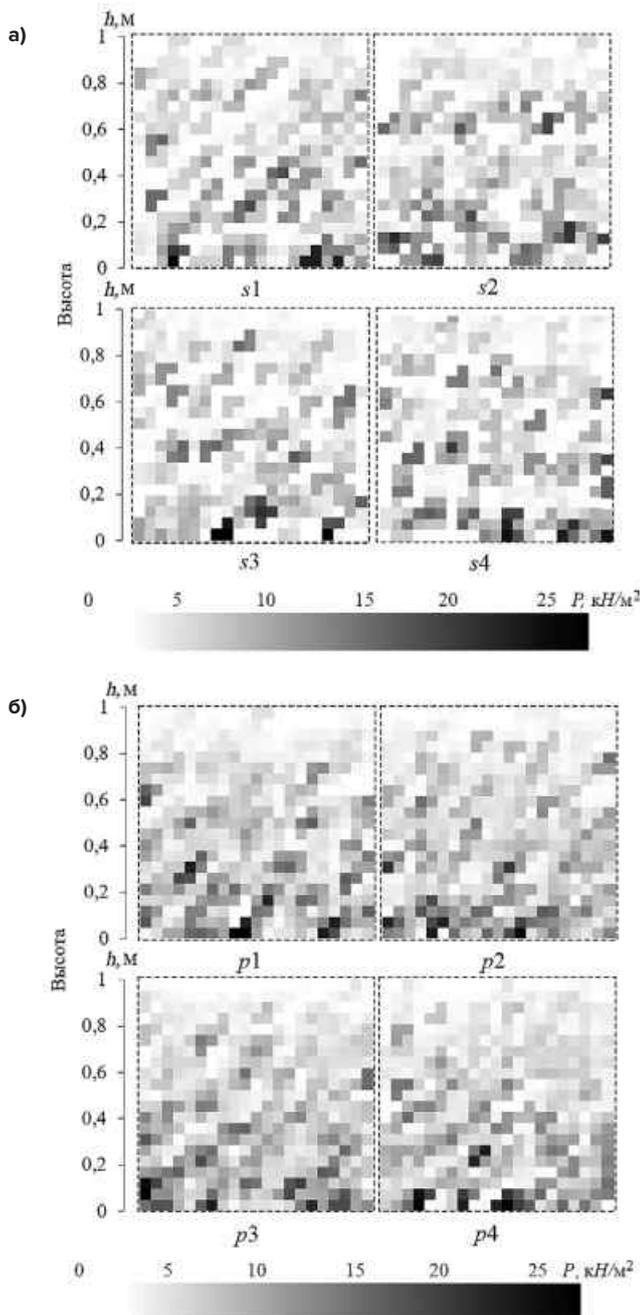


Рис. 6  
Нормальное давление на рассматриваемой стенке:  
а – s1-s4;  
б – p1-p4

Fig. 6  
Normal pressure on the wall under consideration:  
а – s1-s4;  
б – p1-p4

По результатам имитационного моделирования получилась картина действия давления сыпучего материала под действием сил тяжести на рассматриваемую грузонесущую емкость.

Рассмотрим центральный сегмент с размерами 1×1 м для определения числовых значений давления сыпучего материала на стенку (борт) грузонесущей емкости. На рис. 6 показана цветовая карта давления рассматриваемого сегмента для различных экспериментов. Различие показателей давления в экспериментах вызвано многообразием возможных форм взаиморасположения частиц в моделируемом процессе.

Для сравнения результатов рассмотрим полученные числовые значения давления с разными геометрическими параметрами частиц сыпучего материала. Для более наглядного сравнения найдем зависимость среднего давления от высоты. Усредним все найденные значения давления  $P$ , кН/м<sup>2</sup>, для каждой из высот  $h$ , м, полученные МДЭ для экспериментов с формой частиц в виде сферы s1-s4 и полигидрона p1-p4, по формуле:

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i,$$

где  $P_i$  – давление, полученное в результате имитационного моделирования;  $n$  – число измерений на заданной высоте.

На графиках (рис. 7, 8) представлены результаты имитационного моделирования МДЭ, а также полученные усредненные числовые значения давления. Построены графики

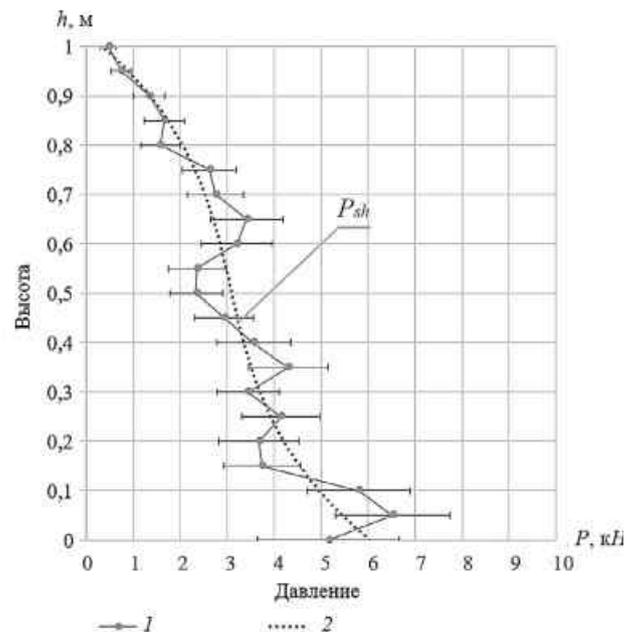
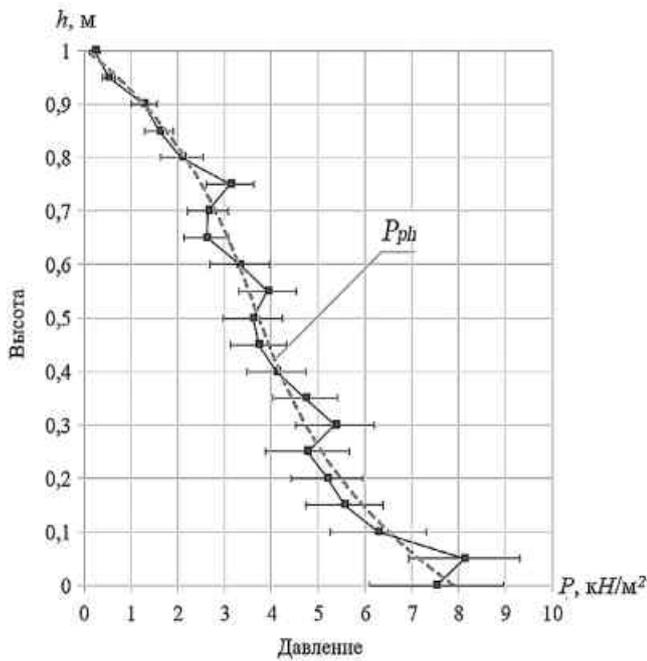


Рис. 7  
График влияния высоты стенки  $h$  на давление  $P$  для частиц в виде сферы s1-s4:  
1 – точки среднего значения давления; 2 – кривая, образованная полиномом 3-й степени

Fig. 7  
Influence diagram of the wall height  $h$  on pressure  $P$  for the spherical particles (s1-s4):  
1 – points of the mean pressure value, 2 – a curve formed by a polynomial of the third degree



**Рис. 8**  
График влияния высоты стенки  $h$  на давление  $P$  для частиц в виде полигидрона  $p1-p4$ :  
1 – точки среднего значения давления;  
2 – кривая, образованная полиномом 3-й степени

**Fig. 8**  
Influence diagram of the wall height  $h$  on pressure  $P$  for the polyhedron particles ( $p1-p4$ ):  
1 – points of the mean pressure value;  
2 – a curve formed by a polynomial of the third degree

с доверительным интервалом 95% с целью раскрытия статической неопределенности поведения грунта и получения возможных числовых значений давления.

Анализ графиков (см. рис. 7, 8) показывает, что давление частиц сыпучего материала на стенку увеличивается с глубиной, при этом отклонения числовых значений давления увеличиваются к основанию относительно среднего давления, достигая наибольших значений на максимальной глубине. Вид получившейся кривой аналогичен экспериментальным результатам расчетов, полученным другими исследователями [20–24].

На основании имитационного моделирования МДЭ получен массив экспериментальных данных и числовых значений давления, который позволил вывести регрессионные уравнения зависимости влияния высоты стенки  $h$  на давление  $P$  для частиц:

– в виде сферы  $s1-s4$ :

$$P_{sh} = -13219h^3 + 20204h^2 - 12688h + 6050, \frac{\text{Па}}{\text{м}}; R^2 = 0,88;$$

– в виде полигидрона  $p1-p4$ :

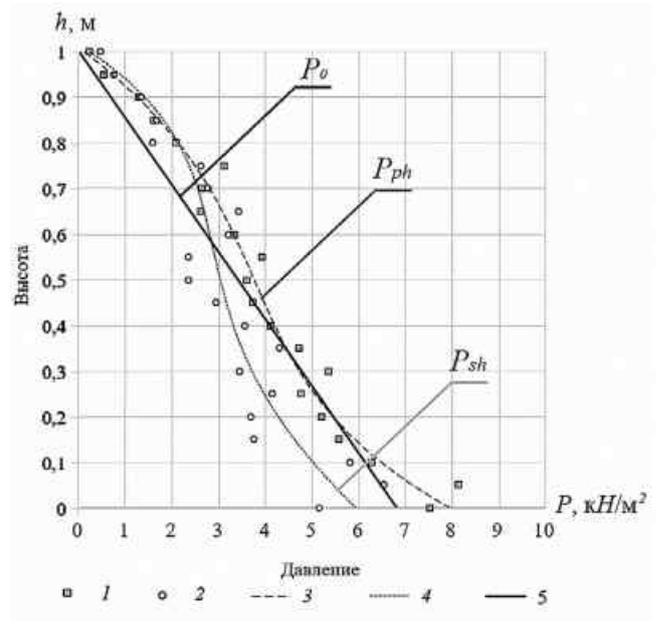
$$P_{ph} = -14393h^3 + 22589h^2 - 16037h + 7905, \frac{\text{Па}}{\text{м}}; R^2 = 0,97.$$

**Результаты и обсуждение**

Полученные различными методами результаты определения статических нагрузок на борт ГП КС представлены на рис. 9.

Анализ влияния высоты стенки на нормальное давление борта ГП (см. рис. 9) аналитическим методом и имитационным моделированием МДЭ показывает, что:

– результаты расчетов, числовые значения давления



**Рис. 9**  
Влияние высоты стенки на нормальное давление борта ГП:  
1 – МДЭ для частиц в виде сферы  $P_{sh}$ ; 2 – МДЭ для частиц в виде полигидрона  $P_{sh}$ ;  
3 – линия тренда, полученная полиномом третьей степени  $P_{ph}$ ;  
4 – линия тренда, полученная полиномом третьей степени  $P_{sh}$ ;  
5 – линия тренда, полученная методом Мора-Кулона,  $P_0$

**Fig. 9**  
Influence of the wall height on the normal pressure of the body side:  
1 – Discrete elements method for the spherical particles  $P_{sh}$ ;  
2 – Discrete elements method for polyhedron particles  $P_{sh}$ ;  
3 – a trend line obtained by the polynomial of the third power  $P_{ph}$ ;  
4 – a trend line obtained by the polynomial of the third power  $P_{sh}$ ;  
5 – a trend line obtained by the Mohr-Coulomb method  $P_0$

рассматриваемыми методами характеризуются сходимостью;

– МДЭ дает более полное представление о характере сил, действующих на подпорную стенку;

– имитационное моделирование МДЭ для частиц в виде сфер производится быстрее по времени, но имеет больший разброс получаемых числовых значений давления, так как контакт форм частиц точечный, а не плоскостной, следовательно, имеет большую погрешность для получения конечных результатов.

**Выводы**

В результате оценки методов расчетов статических нагрузок, действующих на борт ГП КС, можно сделать вывод о том, что в настоящее время существует достаточное количество методов и методик для изучения взаимодействий дискретных элементов (частиц сыпучих сред, материалов) с различными характеристиками.

Имитационное моделирование МДЭ имеет возможность изучения различных параметров (разрушения частиц, износа материалов и т.п.) без применения сложных физических экспериментов за счет большего приближения моделируемых процессов к реальным условиям эксплуатации. Поведение засыпаемого сыпучего материала в ГП КС прогнозируется адекватнее моделью дискретного взаимодействия частиц, а не моделью сплошной среды.

## Список литературы

1. Дубинкин Д.М. Основы цифрового создания автономных карьерных самосвалов. *Горное оборудование и электромеханика*. 2022;(2):39–50. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-2-39-50>
2. Дубинкин Д.М., Ялышев А.В. Анализ конструкций и обоснование применения грузовых платформ карьерных самосвалов грузоподъемностью 90 тонн. *Техника и технология горного дела*. 2021;(3):61–78. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2021-3-61-78>
3. Bhaskar C.V., Rangaswamy H., Imran Ali M.R. Optimization of load carrying capability of tipper truck cargo body using non-linear structural analysis. *International Journal of Ignited Minds*. 2015;2(5):60–64.
4. Krishna K.V., Reddy K.Y., Venugopal K., Ravi K. Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014;263(6):062065. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/6/062065>
5. Garg D., Bindu R. Design optimization of truck body floor for heavy loading. *IOSR Journal of Engineering*. 2012;2(8):48–52. <https://doi.org/10.9790/3021-02834852>
6. Цытович Н.А. *Механика грунтов*. 4-е изд. М.: Стройиздат; 1963. 636 с.
7. Försström D., Jonsén P. Load intensity calculations on tipper body using dem fem coupling. In: *11<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) and 5<sup>th</sup> European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6<sup>th</sup> European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, 20–25 July 2014*, pp. 20–25.
8. Дубинкин Д.М. Методика определения нагрузок, действующих при погрузке и разгрузке грузовой платформы (кузова) карьерного самосвала. *Горное оборудование и электромеханика*. 2022;(3):31–49. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-3-31-49>
9. Шапиро Д.М. Инженерный метод расчета давления грунта на подпорные стенки. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. *Строительство и архитектура*. 2017;8(3):51–61. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.3.06>
10. Коровкин В.С. Инженерная кинематическая теория контактного давления грунта и ее приложение к статическому расчету тонких причальных стенок. *Инженерно-строительный журнал*. 2013;(6):39–49. <https://doi.org/10.5862/МСЕ.41.5>
11. Богомолов А.Н., Иванов А.С., Богомолова О.А., Прокопенко А.В. Сравнение результатов расчета величины активного давления на ограждение котлована, вызванного собственным весом грунта и равномерно распределенной по его поверхности полой нагрузкой. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2013;(31-2):240–250.
12. Hui H., Mengqi Y., Peiyuan L., Xingli L. Passive earth pressures on retaining walls for pit-in-pit excavations. *IEEE Access*. 2019;(7):5918–5931. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2889991>
13. Iskander M., Zhibo C., Omidvar M., Guzman I., Elsherif O. Active static and seismic earth pressure for c-φ soils. *Soils and Foundations*. 2013;53(5):639–652. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.08.003>
14. Xie Y., Leshchinsky B. Active earth pressures from a log-spiral slip surface with arching effects. *Géotechnique Letters*. 2016;6(2):149–155. <https://doi.org/10.1680/jgele.16.00015>
15. Арсентьев В.А., Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Иванов К.С., Кривцов А.М., Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов. *Обогащение руд*. 2010;(1):30–35. Режим доступа: <https://rudmet.ru/journal/5/article/1644/>
16. Клишин С.В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(12):273–277.
17. Самусев П.А. Исследование влияния технологических процессов добычи угля на его грансостав. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 1999;(2):50–51.
18. Бирюков А.В., Протасов С.И., Самусев П.А. Прогнозирование гранулометрического состава угля. В кн.: *Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 11–14 ноября 1997 года*. Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т; 1997. Ч. 1. С. 165–166.
19. Coetzee C.J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. *Powder Technology*. 2016;297:50–70. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.003>
20. Coetzee, C.J. Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*. 2017;310:104–142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>
21. An Z., Ying A., Abdou M. Application of discrete element method to study mechanical behaviors of ceramic breeder pebble beds. *Fusion Engineering and Design*. 2007;82(15-24):2233–2238. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.02.004>
22. Баданин А.Н., Бугров А.К., Кротов А.В. Обоснование первой критической нагрузки на зернистую среду супесчаного основания. *Инженерно-строительный журнал*. 2012;(9):29–34. Режим доступа: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/9\(35\)/05.pdf?ysclid=lawtpxn1vm564465049](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/9(35)/05.pdf?ysclid=lawtpxn1vm564465049)
23. Hu W., Zhu X., Zeng Y., Liu X., Peng C. Active earth pressure against flexible retaining wall for finite soils under the drum deformation mode. *Scientific Reports*. 2022;(12):497. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04411-4>
24. Yang M., Deng B. Simplified method for calculating the active earth pressure on retaining walls of narrow backfill width based on DEM analysis. *Advances in Civil Engineering*. 2019:1507825. <https://doi.org/10.1155/2019/1507825>

## References

1. Dubinkin D.M. Justification of the need to create heavy platforms for open-pit mining. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022;(2):39–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-2-39-50>
2. Dubinkin D.M., Yalyshv A.V. Analysis of constructions and justification for the use of loading platforms for 90-ton quarry dump trucks. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2021;(3):61–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2021-3-61-78>
3. Bhaskar C.V., Rangaswamy H., Imran Ali M.R. Optimization of load carrying capability of tipper truck cargo body using non-linear structural analysis. *International Journal of Ignited Minds*. 2015;2(5):60–64.
4. Krishna K.V., Reddy K.Y., Venugopal K., Ravi K. Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014;263(6):062065. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/6/062065>
5. Garg D., Bindu R. Design optimization of truck body floor for heavy loading. *IOSR Journal of Engineering*. 2012;2(8):48–52. <https://doi.org/10.9790/3021-02834852>

6. Tsytoich N.A. Soil mechanics. 4th ed. Moscow: Stroizdat; 1963. 636 p. (In Russ.)
7. Försström D., Jonsén P. Load intensity calculations on tipper body using dem fem coupling. In: *11<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) and 5<sup>th</sup> European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6<sup>th</sup> European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, 20–25 July 2014*, pp. 20–25.
8. Dubinkin D.M. Method of determining the loads acting during loading and unloading of the cargo platform (body) career self-dump. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022;(3):31–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-3-31-49>
9. Shapiro D.M. Engineering method of calculating soil pressure on retaining walls. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2017;(8(3)):51–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.3.06>
10. Korovkin V.S. Engineering kinematic theory of the contact earth pressure and its application to the static calculation of thin quay walls. *Magazine of Civil Engineering*. 2013;(6):39–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.41.5>
11. Bogomolov A.N., Ivanov A.S., Bogomolova O.A., Prokopenko A.V. The comparison of the results of calculation of active pressure on pit fence caused by the own soil weight and strip load equally spread on its surface. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013;(31-2):240–250. (In Russ.)
12. Hui H., Mengqi Y., Peiyuan L., Xingli L. Passive earth pressures on retaining walls for pit-in-pit excavations. *IEEE Access*. 2019;(7):5918–5931. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2889991>
13. Iskander M., Zhibo C., Omidvar M., Guzman I., Elsherif O. Active static and seismic earth pressure for c–φ soils. *Soils and Foundations*. 2013;53(5):639–652. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.08.003>
14. Xie Y., Leshchinsky B. Active earth pressures from a log-spiral slip surface with arching effects. *Géotechnique Letters*. 2016;6(2):149–155. <https://doi.org/10.1680/jgele.16.00015>
15. Arsentyev V.A., Blekhman I.I., Blekhman L.I., Vaisberg L.A., Ivanov K.S., Krivtsov A.M. Dynamics of particles and discrete element methods as a tool of studies and optimization of natural and man-made materials processing. *Obogashchenie Rud*. 2010;(1):30–35. (In Russ.) Available at: <https://rudmet.ru/journal/4/article/1659/>
16. Klishin S.V. Implementation of discrete element technique during the analysis of gravitation movement of granular material in the convergent channel. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(12):273–277. (In Russ.)
17. Samusev P.A. Research into the impact of technological processes of coal mining on its particle size distribution. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 1999;(2):50–51. (In Russ.)
18. Biryukov A.V., Protasov S.I., Samusev P.A. Forecasting of particle size distribution of coal. In: *Natural and Intellectual Resources of Siberia: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, 11–14 November 1997*. Kemerovo: Kuzbass State Technical University; 1997, part. 1, pp. 165–166. (In Russ.)
19. Coetzee C.J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. *Powder Technology*. 2016;297:50–70. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.003>
20. Coetzee, C.J. Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*. 2017;310:104–142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>
21. An Z., Ying A., Abdou M. Application of discrete element method to study mechanical behaviors of ceramic breeder pebble beds. *Fusion Engineering and Design*. 2007;82(15-24):2233–2238. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.02.004>
22. Badanin A.N., Bugrov A.K., Krotov A.V. The determination of the first critical load on particulate medium of sandy loam foundation. *Magazine of Civil Engineering*. 2012;(9):29–34. (In Russ.) Available at: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/9\(35\)/05.pdf?ysclid=lawtpxn1vm564465049](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/9(35)/05.pdf?ysclid=lawtpxn1vm564465049)
23. Hu W., Zhu X., Zeng Y., Liu X., Peng C. Active earth pressure against flexible retaining wall for finite soils under the drum deformation mode. *Scientific Reports*. 2022;(12):497. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04411-4>
24. Yang M., Deng B. Simplified method for calculating the active earth pressure on retaining walls of narrow backfill width based on DEM analysis. *Advances in Civil Engineering*. 2019:1507825. <https://doi.org/10.1155/2019/1507825>

**Информация об авторах**

**Дубинкин Дмитрий Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8193-9794>; e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

**Ялышев Алексей Витальевич** – младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии», Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: yalyshevav@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 11.11.2022  
 Поступила после рецензирования: 25.11.2022  
 Принята к публикации: 25.11.2022

**Information about the authors**

**Dmitry M. Dubinkin** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8193-9794>; e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

**Alexey V. Yalyshev** – Junior Research Associate, Digital Technologies Research Center, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: yalyshevav@kuzstu.ru

**Article info**

Received: 11.11.2022  
 Revised: 25.11.2022  
 Accepted: 25.11.2022