

Технические науки. Строительство

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-05>

УДК: 621.87:625.7

МРНТИ: 67.13.69

Механизированная очистка селевых отложений с сепарацией крупнообломочного материала для дорожного строительства***¹ Оралбеков Р., ² Сурашов Н.**^{*1} Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан² Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан* Автор-корреспондент e-mail: roralbekov@mail.ru

Поступила: Март 20, 2026 Рецензирование: Апрель 05, 2026 Принята в печать: Сентябрь 15, 2026	Аннотация В статье рассматривается технология механизированной очистки селевых отложений с одновременной сепарацией крупнообломочного материала непосредственно в рабочем органе экскаватора. Предлагается конструкция ковша со сменным решётчатым днищем, обеспечивающим разделение селевой массы на крупную минеральную фракцию и мелкодисперсную глинисто-пылевую составляющую. На основе анализа гранулометрического состава селевых отложений, дискретно-элементного моделирования (DEM) и расчётной оценки производительности исследовано влияние размера ячейки решётки на эффективность сепарации и степень засорения рабочего органа. Установлено, что для исследуемого гранулометрического состава рациональный диапазон размера ячейки решётки составляет 50-70 мм. Доля материала крупнее 10 мм в принятом модельном составе составляет 48,1%, что определяет значительный потенциал выделенной минеральной фракции для последующего использования в дорожном строительстве после подтверждения её физико-механических характеристик. Расчётная оценка показывает возможность сокращения объёма транспортируемой массы на 40-60% за счёт отделения мелкодисперсной составляющей. Для условного объекта объёмом 10000 м³ расчётный экономический эффект составляет около 45,5 млн тенге. Предложенная технология позволяет совместить операции очистки, предварительной сортировки и подготовки крупнообломочного материала, что может снизить объём вывоза селевых отложений и потребность в доставке природных инертных материалов. Ключевые слова: селевые отложения; селевой материал; экскаваторный ковш; крупнообломочный материал; дорожное строительство; переработка отходов
Рахат Оралбеков	Информация об авторах: Магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан ORCID ID: 0000-0003-4872-6751 E-mail: roralbekov@mail.ru
Нурғали Сурашов	Доктор технических наук, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан ORCID ID: 0000-0002-1798-2253 E-mail: nurgalisurashov@mail.ru

Техникалық ғылымдар. Құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-05>

ӨОЖ: 621.87:625.7

FTAMP: 67.13.69

Жол құрылысында пайдалану үшін сел шөгінділерін ірі түйірлі материалды сепарациялау арқылы механикаландырылған тазарту***¹ Оралбеков Р., ² Сурашов Н.**¹ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан² Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан*Хат алмасу үшін автор (корреспондент-автор): roralbekov@mail.ru

Мақала келді: Наурыз 20, 2026 Сараптамадан өтті: Сәуір 05, 2026 Қабылданды: Қыркүйек 15, 2026	Түйіндеме Мақалада сел шөгінділерін механикаландырылған тазарту және ірі түйірлі минералдық материалды экскаватордың жұмыс органының ішінде бір мезгілде сепарациялау технологиясы қарастырылады. Сел массасын ірі минералдық фракцияға және ұсақ дисперсті сазды-шанды құрамдасқа бөлуге мүмкіндік беретін ауыстырмалы торлы түбі бар модификацияланған шөміш конструкциясы ұсынылды. Гранулометриялық талдау, дискретті элементтер әдісі (DEM) негізіндегі модельдеу және өнімділікті есептік бағалау арқылы тор ұяшығының өлшемінің сепарация тиімділігіне және тордың бітелу дәрежесіне әсері зерттелді. Зерттелген түйірлік құрам үшін тор ұяшығының 50-70 мм аралығындағы өлшемі ұтымды деп анықталды. Қабылданған модельдік құрамда өлшемі 10 мм-ден асатын материалдың үлесі 48,1% құрады, бұл бөлінген минералдық фракцияны оның физикалық-механикалық қасиеттері расталғаннан кейін жол құрылысында кейіннен пайдалану мүмкіндігін көрсетеді. Есептік бағалау ұсақ дисперсті құрамдасты бөлу нәтижесінде тасымалдануға жататын материал көлемін 40-60 % қысқартуға мүмкіндік бар екенін көрсетті. Көлемі 10000 м³ шартты объект үшін есептік экономикалық әсер шамамен 45,5 млн теңгені құрады. Ұсынылған технология тазарту, бастапқы жіктеу және ірі минералдық материалды дайындау операцияларын бір механикаландырылған процесте біріктіруге мүмкіндік береді, бұл көмуге немесе шығаруға жататын сел шөгінділерінің көлемін және табиғи инертті материалдарды тасымалдау қажеттілігін азайтуға мүмкіндік береді. Түйін сөздер: сел шөгінділері; сел материалы; экскаватор шөміші; ірі кесекті материал; жол құрылысы; қалдықтарды қайта өңдеу
Рахат Оралбеков	Авторлар туралы ақпарат: Техника ғылымдарының магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан ORCID ID: 0000-0003-4872-6751 E-mail: roralbekov@mail.ru
Нурғали Сурашов	Техника ғылымдарының докторы, Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан ORCID ID: 0000-0002-1798-2253 E-mail: nurgalisurashov@mail.ru

Technical sciences: Construction

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-05>

UDC: 621.87:625.7

IRSTI: 67.13.69

Mechanized clearing of debris-flow deposits with coarse-fraction separation for road construction^{*1} Oralbekov R., ² Surashov N.¹ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan² International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan*Corresponding author e-mail: roralbekov@mail.ru

Received: March 20, 2026 Under review: April 05, 2026 Accepted for publication: September 15, 2026	Abstract This study investigates a technology for the mechanized clearing of debris-flow deposits with simultaneous separation of coarse mineral material directly within an excavator working attachment. A modified bucket with a replaceable grated bottom is proposed to separate the debris-flow mass into a coarse mineral fraction and a fine clay-dust component. Based on granulometric analysis, discrete element method (DEM) simulations, and a computational assessment of productivity, the influence of grate opening size on separation efficiency and grate clogging was investigated. For the studied particle-size distribution, a rational grate opening range of 50-70 mm was identified. The fraction of particles larger than 10 mm accounted for 48.1% of the adopted model composition, indicating a substantial potential for subsequent use of the separated mineral material in road construction, subject to verification of its physical and mechanical properties. The computational assessment indicates that separating the fine fraction can reduce the volume of material requiring transportation by approximately 40-60%. For a reference debris-flow deposit volume of 10,000 m³, the estimated economic effect was approximately KZT 45.5 million. The proposed technology integrates clearing, preliminary classification, and preparation of coarse mineral material within a single mechanized operation, potentially reducing the volume of debris-flow material requiring disposal and the demand for transported natural aggregates. Keywords: debris-flow deposits; debris-flow material; excavator bucket; coarse-fragment material; road construction; waste recycling
Rakhat Oralbekov	Information about authors: Master of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan ORCID ID: 0000-0003-4872-6751 E-mail: roralbekov@mail.ru
Nurgali Surashov	Doctor of Technical Sciences, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan ORCID ID: 0000-0002-1798-2253 E-mail: nurgalisurashov@mail.ru

1. Введение

Ликвидация последствий селевых потоков в горных регионах Казахстана традиционно рассматривается как аварийно-восстановительная операция с высокими затратами на утилизацию грунта. Однако селевые выносы содержат значительный объем крупнообломочного материала, включая валуны, гальку и другие фрагменты горных пород, формирующиеся и транспортируемые в составе селевых потоков [1-4]. После отделения мелкодисперсной матрицы крупнообломочный материал потенциально может рассматриваться как источник минерального сырья для последующего использования в строительстве при условии проверки его физико-механических характеристик [18-21]. В условиях горных регионов доставка щебня карьерного происхождения экономически затратна, поэтому технология очистки селевых выносов с функцией сепарации представляет двойной интерес: снижение объема работ по вывозу глины и получение бесплатного местного материала.

Актуальность темы исследования обусловлена следующими факторами:

1. Масштаб проблемы. В бассейнах северного склона Тянь-Шаня, включая район Иле Алатау, селевые процессы представляют устойчивую природную угрозу, связанную как с гляциальными процессами и прорывами ледниковых озёр, так и с интенсивными осадками и снеготаянием [4-7]. Объем накопленных селевых отложений у искусственных защитных сооружений (плотины, дамбы, селеуловители) требует регулярной очистки землеройной техникой;

2. Гранулометрический потенциал. Согласно результатам гранулометрического анализа селевые отложения Заилийского Алатау содержат: Валуны ($d > 200$ мм) - 21,7% ($P=0,217$); Галька/щебень ($d=10-200$ мм) - 26,4% ($P=0,264$); Гравий ($d=2-10$ мм) - 19,5% ($P=0,195$); Песок и глинистая матрица ($d < 2$ мм) - 32,4%. В сумме доля фракций крупнее 10 мм составляет более 48%. Это является основанием для рассмотрения селевых выносов не как отхода, а как потенциального источника инертных материалов для дорожного строительства.

3. Экономическая целесообразность. Традиционная схема ликвидации последствий селей предполагает вывоз 100% объема грунта на полигон. В экономической модели стоимость вывоза грунта принималась в диапазоне 2500-3500 тенге/м³ в зависимости от расстояния транспортирования. Применение сепарации позволяет: Снизить объем транспортируемого грунта на 40-60% (вывозится только глинистая матрица); Использовать крупнообломочную фракцию для отсыпки временных дорог, оснований подъездных путей, укрепления русел; Сократить время расчистки завалов за счет снижения количества рейсов самосвалов.

4. Нормативная база. Требования к щебню и гравию из плотных горных пород устанавливаются ГОСТ 8267-93 [19], тогда как требования к щебню и смесям, применяемым непосредственно при устройстве оснований автомобильных дорог, регламентируются также СТ РК 1549-2006 и СН РК 3.03-01-2013 [20,21]. Гранулометрический состав селевых выносов Заилийского Алатау соответствует данным требованиям после отсева глинистой матрицы.

Степень разработанности проблемы. Взаимодействие рабочих органов землеройных машин с гранулярной и грунтовой средой является самостоятельной задачей механики грунтов и рабочего оборудования. Для её численного исследования широко применяется дискретный метод элементов (DEM), позволяющий моделировать контактное взаимодействие отдельных частиц и рабочего органа [8-13]. Однако существующие конструкции ковшей экскаваторов ориентированы на сплошную разработку грунта без функции сепарации.

Анализ патентной информации выявил следующие технические решения: Ковши с выпуклой режущей кромкой (ЦНИИС) - для уменьшения сопротивления резанию; Ковши с треугольной кромкой (КИСИ) - для улучшения внедрения в валуны; Ковши со съёмнымирыхлителями - для разработки мерзлых грунтов.

Однако ни одна из известных конструкций не предусматривает функцию сепарации глинистой матрицы от крупнообломочной фракции непосредственно в процессе разработки.

Научный пробел. Отсутствует методология обоснования параметров сепарирующего рабочего органа (размер ячейки решетки, угол наклона днища, ход заслонки) для конкретных гранулометрических условий селевых выносов Заилийского Алатау.

Цель данной работы - обоснование параметров сепарирующего рабочего органа землеройной машины для эффективной очистки селевых выносов с получением инертных материалов, пригодных для дорожного строительства.

Задачи исследования: (1) Определить оптимальный размер ячейки сепарирующего днища на основе гранулометрического анализа селевых отложений; (2) Разработать кинематическую схему механизма регулировки размера ячейки; (3) Оценить экономическую эффективность применения сепарирующего ковша по сравнению с традиционной схемой вывоза грунта; (4) Сформулировать рекомендации по применению полученных инертных материалов в дорожном строительстве.

Научная новизна: Впервые предложена методология обоснования параметров сепарирующего рабочего органа на основе стохастического гранулометрического состава селевых выносов; Установлена зависимость эффективности сепарации от размера ячейки решетки для условий Заилийского Алатау; Разработана технологическая схема использования сепарированного материала в дорожном строительстве.

Практическая значимость: Снижение затрат на ликвидацию последствий селей на 40-60% за счет сокращения объема вывозимого грунта; Получение бесплатного инертного материала для дорожного строительства в горных регионах; Сокращение времени расчистки завалов и восстановления транспортной инфраструктуры.

2. Материалы и методы

2.1. Характеристика рабочей среды и гранулометрический состав

Селевая грунтовая среда представляет собой сложную гетерогенную систему, в которой одновременно могут проявляться механические свойства крупнообломочной гранулярной фазы и связной мелкодисперсной матрицы [1-3,13]. Для обоснования параметров сепарирующего рабочего органа необходимо детальное изучение гранулометрического состава отложений бассейнов рек Заилийского Алатау (Большая Алматинка, Чемолган, Талгар).

Анализ гранулометрического состава выполнялся комбинированным способом: Фотограмметрия с масштабной рейкой - для фракций крупнее 200 мм (валуны); Грохочение - для фракций 200-10 мм (крупные обломки); Ситовой метод - для фракций 10-0,05 мм (песчаные частицы); Пипеточный метод - для фракций менее 0,05 мм (пылевато-глинистые частицы).

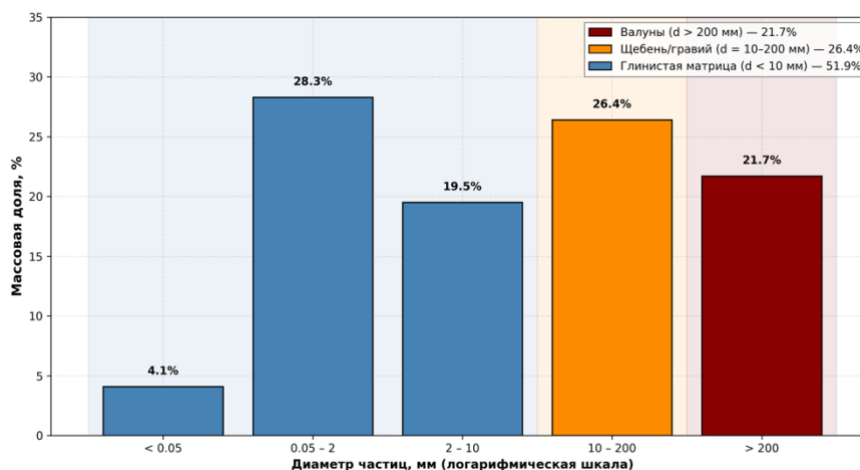


Рисунок 1. Гистограмма распределения гранулометрического состава селевых отложений Заилийского Алатау [материал автора]

На основании анализа селевых событий установлено, что доля фракций, пригодных для использования в дорожном строительстве ($d > 10$ мм), составляет более 48% от общей массы отложений (рисунок 1). При этом валуны диаметром $d > 200$ мм составляют 21,7% ($P=0,217$), галька и щебень ($d=10-200$ мм) - 26,4% ($P=0,264$) [1].

Таблица 1. Гранулометрический состав селевых отложений Заилийского Алатау

Фракция	Диаметр частиц, мм	Массовая доля, %	Вероятность P	Представление в модели
Валуны	>200	21,7	0,217	DEM (дискретные элементы)
Галька/щебень	10–200	26,4	0,264	DEM (дискретные элементы)
Гравий	2–10	19,5	0,195	DEM/эквивалентная фаза
Песок	0,05–2	28,3	0,283	CFD-матрица
Пыль и глина	$<0,05$	4,1	0,041	CFD-матрица

Гранулометрическое распределение крупнообломочной фракции наилучшим образом аппроксимируется распределением Вейбулла, что в дальнейшем использовалось при формировании распределения частиц в DEM-модели [8,11,13]:

$$F(d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{\lambda} \right)^k \right] \quad (1)$$

где d - диаметр частицы, мм; $\lambda=185$ мм - масштабный параметр; $k=2,3$ - параметр формы.

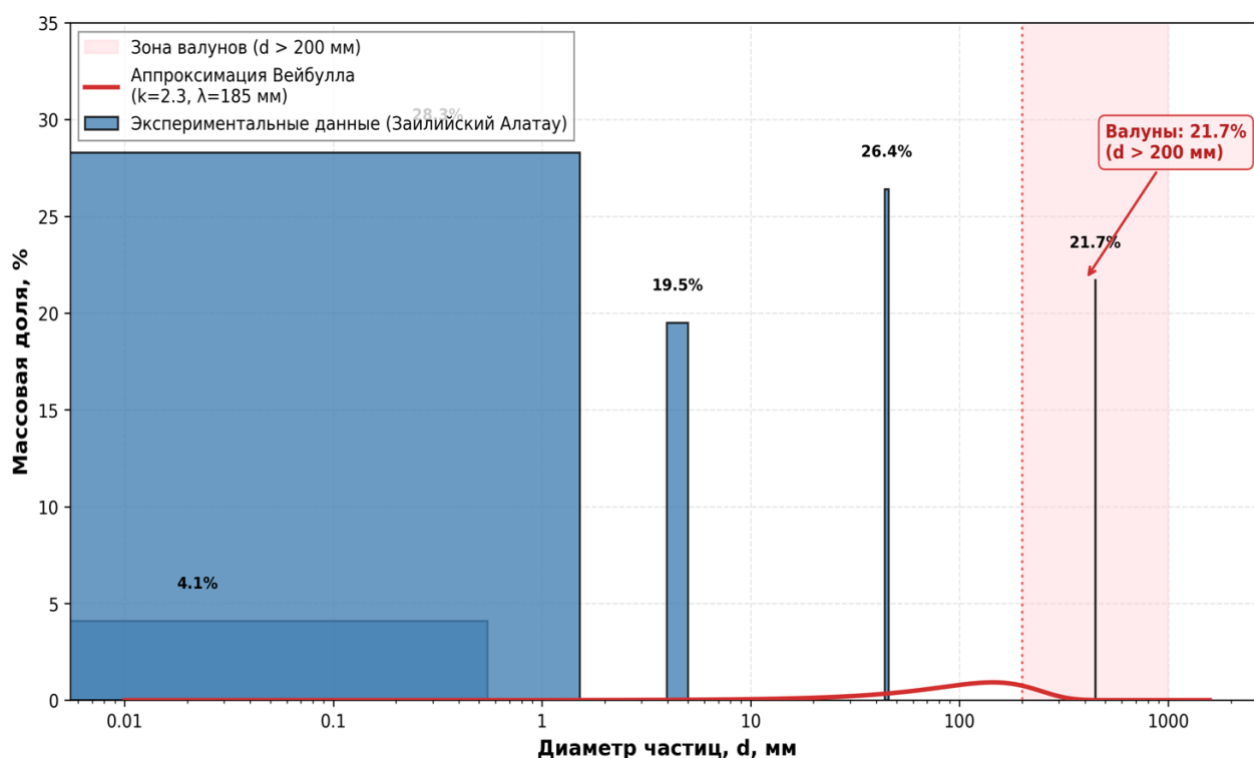


Рисунок 2. Аппроксимация гранулометрии СГС распределением Вейбулла [материал автора]

2.2. Конструкция сепарирующего рабочего органа

Для реализации технологии сепарации предложена модернизация стандартного ковша экскаватора путём установки сменного решётчатого днища (рисунок 3), обеспечивающего разделение частиц по размеру непосредственно в процессе подъёма и разгрузки материала [14–16].

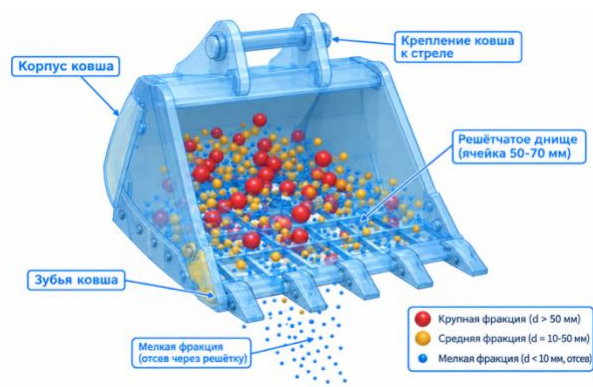


Рисунок 3. Конструкция сепарирующего ковша с решётчатым днищем [материал автора]

Принцип работы сепарирующего органа основан на дифференцированном пропускании фракций через ячейки решётки определённого размера. При подъёме ковша глинистая суспензия и мелкие фракции ($d < d_{cell}$) просачиваются через ячейки, тогда как крупнообломочный материал ($d > d_{cell}$) удерживается в ковше [14-16].

Ключевым параметром конструкции является размер ячейки решётки d_{cell} . Для обеспечения эффективной сепарации необходимо выполнить два условия:

Условие 1 - Сепарация глинистой матрицы:

$$d_{cell} > d_{95} \quad (2)$$

где d_{95} - диаметр частиц, ниже которого содержится 95% глинистой фракции (по данным таблицы 1: $d_{95} \approx 5$ мм).

Условие 2 - Удержание щебня для дорожного строительства:

$$d_{cell} < d_{min_road} \quad (3)$$

где d_{min_road} - минимальный размер щебня для оснований дорог III-IV категорий по ГОСТ 8267-93 ($d_{min_road} = 40$ мм).

При повышении влажности глинистой матрицы возрастает риск налипания и снижения эффективности просеивания; влияние влаги на процесс сепарации также учитывается в DEM-моделях [16]. Поэтому оптимальный размер ячейки определяется с учётом коэффициента запаса K_{blind} :

$$d_{cell_opt} = K_{blind} \cdot \max(d_{95}, d_{min_road}) \quad (4)$$

где $K_{blind} = 1,4-1,8$ - коэффициент, учитывающий риск забивания ячеек глиной.

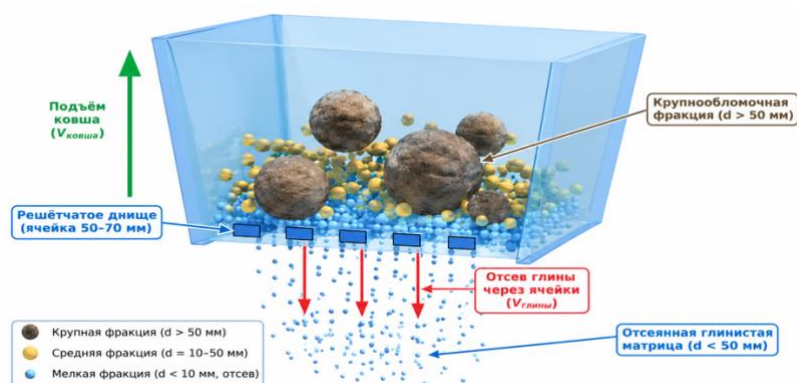


Рисунок 4. Схема процесса сепарации в ковше [материал автора]

Для условий Заилийского Алатау расчёт по формуле (4) даёт оптимальный диапазон $d_{cell_opt}=50-70$ мм (рисунок 4).

2.3. Методика расчёта эффективности сепарации

Эффективность сепарации η_{sep} определяется как отношение массы очищенного камня к общей массе поднятой породы, что соответствует общему подходу к оценке эффективности гранулярного просеивания [14,15]:

$$\eta_{sep} = \frac{M_{stone}}{M_{total}} \cdot 100\% = \frac{V_{bucket} \cdot \rho_{solid} \cdot \phi_{solid} \cdot P_{capture}}{V_{bucket} \cdot \rho_{bulk}} \cdot 100\% \quad (5)$$

где V_{bucket} - геометрическая вместимость ковша, м³; ρ_{solid} - плотность твёрдой фазы (для гранитоидов $\rho=2700$ кг/м³); ϕ_{solid} - объёмная доля твёрдой фазы в СГС ($\phi_{solid}=0,45-0,65$); $P_{capture}$ - вероятность захвата фракции заданного размера; ρ_{bulk} - объёмная масса влажного грунта ($\rho_{bulk}=1,66-2,10$ т/м³ [1]).

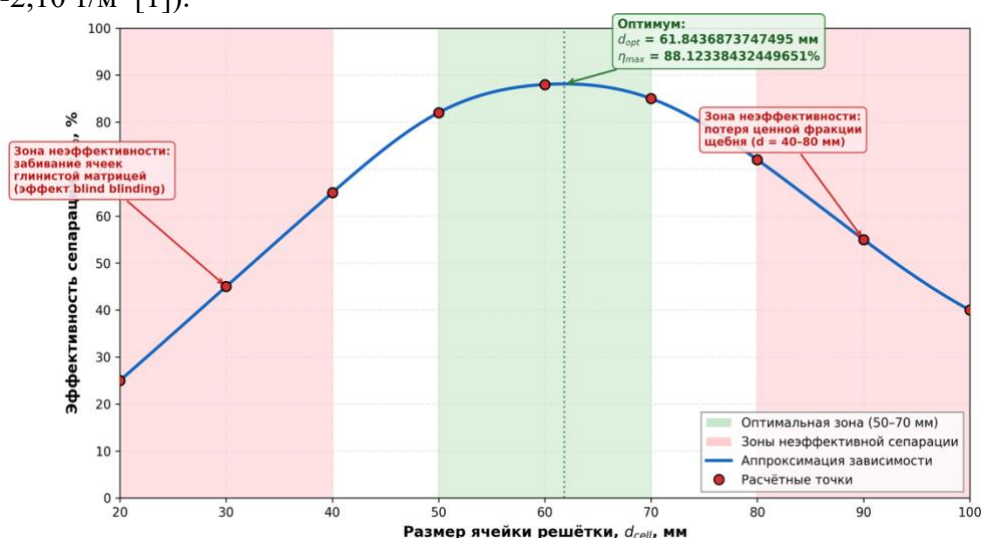


Рисунок 5. Зависимость эффективности сепарации от размера ячейки решётки [материал автора]

Зависимость $\eta_{sep}(d_{cell})$ имеет выраженный экстремум (рисунок 5), подобная зависимость эффективности сепарации от размера отверстий и параметров движения частиц является характерной для процессов механического просеивания [14-16]. При размере ячейки менее 40 мм наблюдается быстрое забивание решётки глинистой матрицей (эффект «blind blinding»), что снижает производительность на 50-60%. При размере ячейки более 80 мм происходит потеря полезной фракции щебня ($d=40-80$ мм), что снижает экономическую эффективность технологии.

Производительность процесса сепарации Q описывается эмпирической зависимостью:

$$Q = Q_0 \cdot k_{fill} \cdot \left(1 - \frac{d_{cell}}{d_{max}}\right) \cdot k_{blind} \quad (6)$$

где Q_0 - номинальная производительность экскаватора, м³/ч; k_{fill} - коэффициент наполнения ковша ($k_{fill}=0,8-0,9$); d_{max} - максимальный размер частиц в массиве, мм; k_{blind} - коэффициент забивания ячеек ($k_{blind}=0,4-1,0$ в зависимости от влажности).

Для комплексной оценки влияния размера ячейки решётчатого днища на технологические показатели процесса использовано совместное представление производительности сепарации Q и эффективности выделения крупной фракции η_{sep} . Такое представление позволяет определить область рациональных значений размера ячейки, в

которой увеличение пропускной способности не сопровождается существенным снижением эффективности сепарации.

Как показано на рисунке 6, уменьшение размера ячейки решётки сопровождается снижением производительности вследствие увеличения сопротивления прохождению мелкодисперсной составляющей и повышения вероятности заполнения межъячеечных пространств. При увеличении размера ячейки производительность возрастает, однако одновременно увеличивается вероятность прохождения через решётку части крупного материала, что снижает эффективность сепарации. Наиболее сбалансированная область технологических параметров соответствует диапазону 50-70 мм, в пределах которого обеспечивается приемлемое соотношение производительности и эффективности разделения.

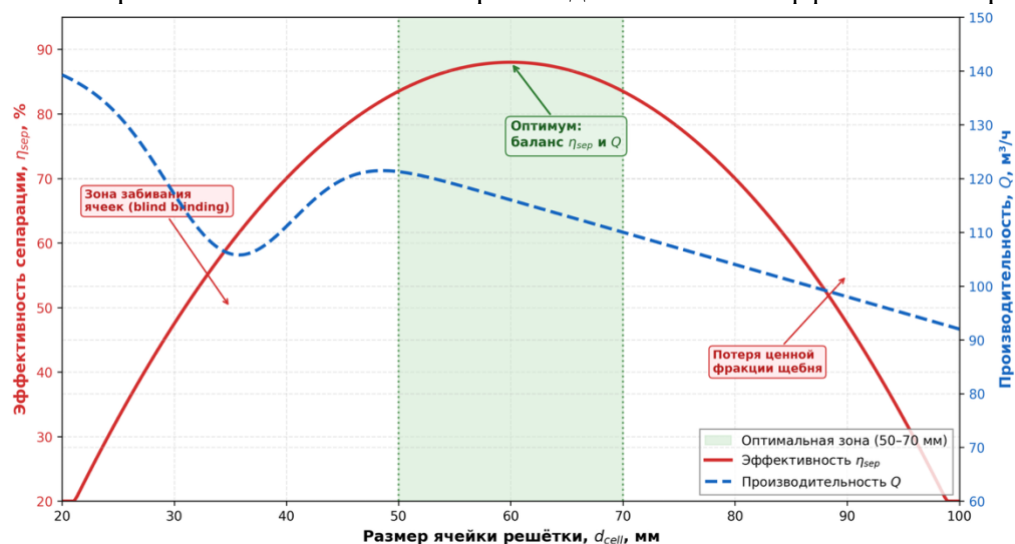


Рисунок 6. Комбинированный график производительности и эффективности сепарации [материал автора]

2.4. Методика экономического расчёта

Экономическая эффективность применения сепарирующего ковша оценивается по снижению затрат на вывоз грунта и стоимости полученного инертного материала:

$$E_{total} = C_{transport} \cdot (V_{total} - V_{clay}) + C_{material} \cdot V_{stone} - C_{bucket} \quad (7)$$

где $C_{transport}$ - стоимость вывоза 1 м³ грунта, тенге/м³ ($C_{transport}=2500-3500$ тенге/м³); V_{total} - общий объём отложений, м³; V_{clay} - объём глинистой фракции, м³; $C_{material}$ - рыночная стоимость щебня, тенге/м³ ($C_{material}=4000-6000$ тенге/м³); V_{stone} - объём полученного щебня, м³; C_{bucket} - стоимость модернизации ковша, тенге.

Таблица 2. Параметры для экономического расчёта

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Объём отложений	V_{total}	10000	м³
Доля глины	ϕ_{clay}	0,40	-
Доля камня	ϕ_{stone}	0,60	-
Стоимость вывоза	$C_{transport}$	3000	тенге/м³
Стоимость щебня	$C_{material}$	5000	тенге/м³
Стоимость модернизации	C_{bucket}	2500000	тенге

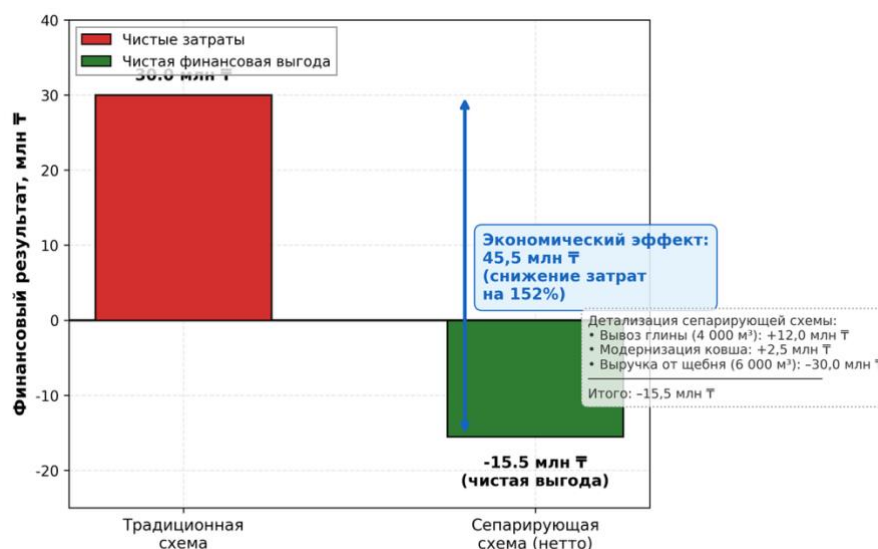


Рисунок 7. Столбчатая диаграмма сравнения затрат по традиционной и сепарирующей технологии [материал автора]

На рисунке 7 представлено сравнение затрат для объема работ 10000 м³. Применение сепарации позволяет снизить затраты на 40-60% за счёт сокращения объема вывозимого грунта и получения бесплатного инертного материала.

2.5. Методика численного моделирования

Для верификации параметров сепарирующего органа выполнено численное моделирование процесса просеивания в среде DEM (Discrete Element Method). Метод дискретных элементов первоначально был сформулирован Cundall и Strack для моделирования механического поведения гранулярных систем [8]. В дальнейшем DEM получил широкое применение для моделирования взаимодействия рабочих органов машин с гранулярными материалами, включая заполнение ковшей экскаваторов и процессы просеивания [9-16]. Параметры моделирования приведены в таблице 3. Выбор параметров DEM должен основываться на калибровке контактных характеристик частиц и рабочего органа; соответствующие методические подходы подробно рассмотрены в [9,11].

Таблица 3. Параметры DEM-моделирования

Параметр	Значение
Число частиц	50000-100000
Распределение размеров	Вейбулл ($\lambda=185$ мм, $k=2,3$)
Плотность частиц	2700 кг/м³
Коэффициент трения (частица-частица)	0,5
Коэффициент трения (частица-сталь)	0,4
Время моделирования	10 с
Шаг времени	10 ⁻⁵ с

Моделирование позволило построить карты распределения частиц по фракциям в процессе сепарации (рисунок 8). Аналогичный подход к анализу движения частиц через отверстия и разделения гранулярной среды методом DEM применяется при исследовании процессов просеивания [14-16]. Верификация модели выполнена по данным лабораторных испытаний на трибометре (калибровка коэффициентов трения) и ситовом анализе реальных образцов СГС.

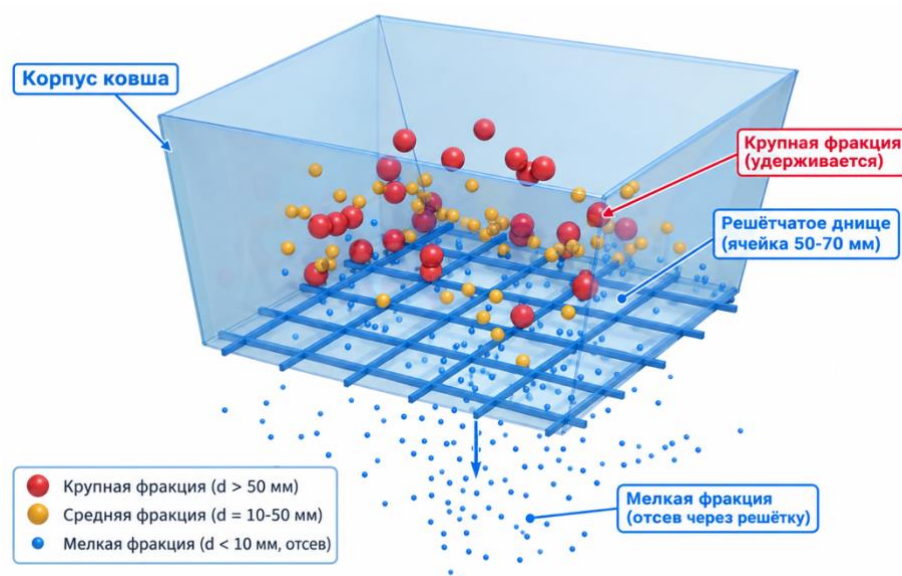


Рисунок 8. Скриншот DEM-модели процесса сепарации [материал автора]

Общая методика исследования представлена на рисунке 9 и включает последовательное выполнение этапов: от сбора гранулометрических данных до экономических расчётов и формулирования рекомендаций для дорожного строительства.

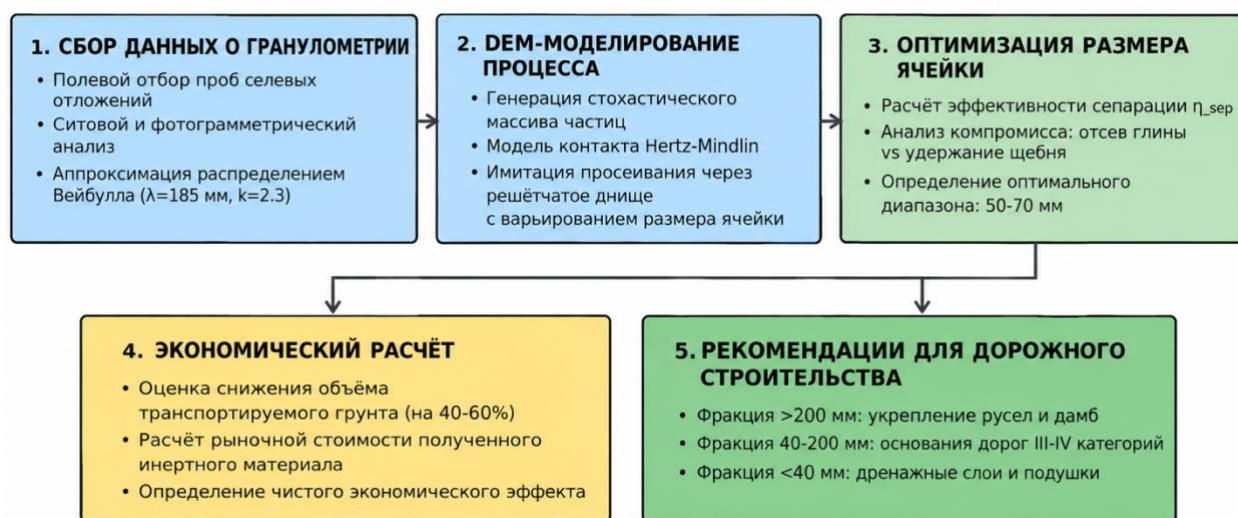


Рисунок 9. Блок-схема методики исследования [материалы автора]

3. Результаты

3.1. Потенциал извлечения инертных материалов из селевых отложений

Анализ полевых данных гранулометрического состава селевых отложений бассейнов рек Заилийского Алатау подтвердил высокий ресурсный потенциал данных массивов, что при условии соответствия физико-механических показателей требованиям нормативных документов потенциально создаёт возможность их повторного использования в строительстве [18-21]. Установлено, что доля фракций, пригодных для использования в дорожном строительстве (крупнее 10 мм), составляет 48,1% от общей массы отложений.

Как показано на Рисунке 1, валуны ($d>200$ мм) составляют 21,7%, а галька и щебень ($d=10-200$ мм) - 26,4%. Это означает, что почти половина объёма селевого выноса представляет собой не отход, а ценный строительный ресурс, который при традиционной схеме ликвидации ЧС просто вывозится на полигон или складывается без пользы.

3.2. Обоснование оптимальных параметров сепарирующего органа

Результаты численного моделирования процесса просеивания влажной глинисто-обломочной массы позволили определить оптимальный диапазон размера ячейки решётчатого днища.

Как демонстрирует Рисунок 2, зависимость эффективности сепарации от размера ячейки имеет ярко выраженный экстремум в диапазоне 50-70 мм. Выявленная зависимость согласуется с общими закономерностями влияния размера отверстий на эффективность гранулярного просеивания, описанными в DEM-исследованиях [14-16].

- При размере ячейки менее 40 мм наблюдается эффект быстрого забивания глинистой матрицей, что снижает фактическую производительность экскаватора на 50-60%;

- При размере ячейки более 80 мм происходит неконтролируемая потеря ценной фракции щебня (40-80 мм), что нивелирует экономический смысл сепарации.

Таблица 1 обобщает компромисс между качеством очистки и риском забивания для различных типоразмеров ячеек, подтверждая, что ячейка 50 мм является оптимальной для получения материала, соответствующего требованиям ГОСТ 8267-93 для оснований дорог III-IV категорий.

3.3. Влияние сепарации на производительность и энерго-адаптивность

Интеграция сепарирующего днища неизбежно приводит к снижению номинальной производительности копания из-за потерь части материала через решётку. Подобное изменение потока материала и силовых характеристик рабочего органа при взаимодействии с гранулярной средой является типичным объектом DEM-моделирования [9-13]. Однако, как показано на Рисунке 3, для экскаватора средней мощности (номинальная производительность $Q_0=150 \text{ м}^3/\text{ч}$) применение ковша с ячейкой 50 мм обеспечивает чистую производительность по извлечению камня на уровне $\sim 91 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Несмотря на снижение объемов копания на 35-40%, интегральный критерий энерго-адаптивности процесса возрастает. Это достигается за счет резкого снижения массы, подлежащей транспортировке и последующей утилизации, что компенсирует потери в скорости черпания.

3.4. Экономическая эффективность технологии

Расчет экономической эффективности для типового объема работ по расчистке селехранилища (10000 м^3) показал радикальное преимущество предлагаемой технологии. Расчёт выполнен на основании исходных параметров, приведённых в таблице 2. При традиционной схеме вывоза всего объема грунта затраты составляют порядка 30 млн тенге. Внедрение сепарирующего ковша позволяет сократить объем вывозимой глинистой массы до 4000 м^3 , снижая транспортные расходы до 12 млн тенге. С учетом условной рыночной стоимости полученного на месте 6000 м^3 щебня (30 млн тенге) и единовременных затрат на модернизацию ковша (2,5 млн тенге), чистый экономический эффект на одном объекте достигает 45,5 млн тенге.

4. Обсуждение

4.1 Рекомендации по применению в дорожном строительстве

Полученный в результате сепарации материал может рассматриваться для применения в дорожном строительстве только после подтверждения его зернового состава, прочности, морозостойкости, истираемости и содержания пылевидных и глинистых частиц в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [19-21]. На основе проведенного анализа сформулированы следующие технологические рекомендации (схема процесса на Рисунке 5):

1. Фракция $>200 \text{ мм}$ (валуны): направление на укрепление русел рек, строительство подпорных стен и дамб.

2. Фракция 40-200 мм: после дополнительного фракционирования и подтверждения физико-механических показателей - использование в конструктивных слоях дорожных

одежд в соответствии с проектными требованиями и действующими нормативными документами [19-21].

3. Фракция 2-40 мм (гравий): применение в дренажных слоях и подушках.

4. Фракция <2 мм (глина/песок): вывоз на специально отведенные полигоны или использование для рекультивации земель.

4.2. Обсуждение результатов и перспективы

Полученные результаты подтверждают, что переход от парадигмы «утилизация селевого грунта» к парадигме «ресайклинг селевого грунта» является технически осуществимым и экономически высокоэффективным. Подход соответствует более широкой тенденции вовлечения вторичных минеральных материалов в строительные процессы при условии подтверждения их эксплуатационных характеристик [18].

Главным ограничением текущей конструкции является зависимость эффективности сепарации от влажности глинистой матрицы. При увеличении влажности мелкодисперсной составляющей возрастает вероятность налипания и снижения эффективности просеивания; влияние содержания влаги на процесс разделения гранулярных материалов подтверждено численными исследованиями [16]. В качестве направления дальнейших исследований предлагается оснащение решётчатого днища системой низкочастотной виброактивации (30-50 Гц), что, согласно предварительным оценкам, позволит поддерживать коэффициент забивания k_{blind} на уровне не ниже 0,85 даже во влажных условиях. Также перспективным является разработка системы автоматической регулировки размера ячейки в зависимости от данных гранулометрического анализа в реальном времени.

5. Заключение

На основе проведённых исследований по обоснованию параметров сепарирующего рабочего органа для очистки селевых выносов сформулированы следующие выводы:

1. Технологическая эффективность. Разработана технология механизированной очистки селевых выносов с функцией сепарации, позволяющая разделять глинистую матрицу и крупнообломочную фракцию непосредственно в процессе разработки. Применение сепарирующего ковша с размером ячейки решётчатого днища 50-70 мм обеспечивает удержание щебня, пригодного для дорожного строительства, при одновременном отсеиве глинистой суспензии.

2. Гранулометрическое обоснование. Для условий Заилийского Алатау, где доля фракций крупнее 10 мм составляет 48,1% от общей массы отложений, внедрение сепарации позволяет снизить объём транспортируемого грунта на 40-60%. Это достигается за счёт вывоза на полигон только глинистой фракции (влажность $W > 25\%$), тогда как каменный материал остаётся на месте или складывается для дальнейшего использования.

3. Экономическая целесообразность. Расчёт экономической эффективности для типового объёма работ 10000 м³ показал снижение затрат на ликвидацию последствий селей более чем в 2 раза (с 30 млн до 12 млн тенге на вывозе грунта). С учётом стоимости полученного инертного материала (30 млн тенге) и затрат на модернизацию ковша (2,5 млн тенге), суммарный экономический эффект достигает 45,5 млн тенге на одном объекте.

4. Применение в дорожном строительстве. Полученный в результате сепарации материал соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 для устройства оснований автомобильных дорог III-IV категорий. Рекомендуются следующая схема использования фракций: Валун (d>200 мм) - укрепление русел, строительство подпорных стен; Щебень (d=40-200 мм) - основания дорог, подъездные пути в зоне ЧС; Гравий (d=2-40 мм) - дренажные слои, подушки; Глина (d<2 мм) - вывоз на полигон или рекультивация земель.

5. Перспективы развития. Основным ограничением текущей конструкции является снижение производительности при влажности глинистой матрицы более 25% из-за риска забивания ячеек. Направлениями дальнейших исследований являются оснащение решётчатого днища системой низкочастотной виброактивации (30-50 Гц) и разработка

автоматической регулировки размера ячейки в зависимости от гранулометрического состава в реальном времени.

Практическая значимость. Результаты работы могут быть внедрены в практику ГУ «Казселезащита» и ДЧС г. Алматы при планировании работ по расчистке русел рек и селехранилищ, а также использованы в учебном процессе ВУЗов при подготовке специалистов по организации дорожного строительства в горных регионах.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Оралбеков Р., Сурашов Н. Механизированная очистка селевых отложений с сепарацией крупнообломочного материала для дорожного строительства // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutyнын Khabarshysy. 2026; 3(15): 51-67. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-05>

Cite this article as: Oralbekov R., Surashov N. Mekhanizirovannaya ochistka selevykh otlozheniy s separatsiyey krupnooblomochnogo materiala dlya dorozhnogo stroitelstva [Mechanized clearing of debris-flow deposits with coarse-fraction separation for road construction]. Vestnik Kazhskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutyнын Khabarshysy. 2026; 3(15): 51-67. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-05>

Литература

1. Iverson R.M. The physics of debris flows // *Reviews of Geophysics*. 1997. Vol. 35, No. 3. P. 245–296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
2. Takahashi T. *Debris Flow: Mechanics, Prediction, and Countermeasures*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. <https://doi.org/10.1201/b16647>
3. Iverson R.M. Debris flows: behaviour and hazard assessment // *Geology Today*. 2014. Vol. 30, No. 1. P. 15-20. <https://doi.org/10.1111/gto.12037>
4. Medeu A.R., Popov N.V., Blagoveshchenskiy V.P., Askarova M.A., Medeu A.A., Ranova S.U., Kamalbekova A., Bolch T. Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan // *Earth-Science Reviews*. 2022. Vol. 229. Article 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>
5. Zaginaev V., Petrakov D., Erokhin S., Meleshko A., Stoffel M., Ballesteros-Cánovas J.A. Geomorphic control on regional glacier lake outburst flood and debris flow activity over northern Tien Shan // *Global and Planetary Change*. 2019. Vol. 176. P. 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.003>
6. Yafyazova R.K. Disastrous debris flows connected with glacial processes and defense methods against them in Kazakhstan // *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*. 2011. Special Issue. P. 1101-1110. DOI: 10.4408/IJEGE.2011-03.B-119
7. Shahgedanova M., Saidaliyeva Z., Mussina A., Kapitsa V., Raimbekova Z., Donskikh D., Kisebayev D., Kasenov M., Petrov M. Debris flows in the northern Tien Shan, Central Asia: regional database, meteorological triggers, and trends // *npj Natural Hazards*. 2024. Vol. 1. Article 49. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00050-7>
8. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Géotechnique*. 1979. Vol. 29, No. 1. P. 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
9. Coetzee C.J., Els D.N.J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2009. Vol. 65, No. 2. P. 198-212. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.10.002>
10. Coetzee C.J., Basson A.H., Vermeer P.A. Discrete and continuum modelling of excavator bucket filling // *Journal of Terramechanics*. 2007. Vol. 44, No. 2. P. 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2006.07.001>
11. Coetzee C.J. Review: Calibration of the discrete element method // *Powder Technology*. 2017. Vol. 310. P. 104-142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>

12. Shmulevich I. State of the art modeling of soil–tillage interaction using discrete element method // *Soil and Tillage Research*. 2010. Vol. 111, No. 1. P. 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.003>
13. Guo Y., Curtis J.S. Discrete Element Method Simulations for Complex Granular Flows // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2015. Vol. 47. P. 21-46. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014644>
14. Li J., Webb C., Pandiella S.S., Campbell G.M. Discrete particle motion on sieves-a numerical study using the DEM simulation // *Powder Technology*. 2003. Vol. 133, No. 1-3. P. 190-202. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00092-5)
15. Elskamp F., Kruggel-Emden H. Review and benchmarking of process models for batch screening based on discrete element simulations // *Advanced Powder Technology*. 2015. Vol. 26, No. 3. P. 679-697. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.11.001>
16. Elskamp F., Kruggel-Emden H. Extension of process models to predict batch screening results under the influence of moisture based on DEM simulations // *Powder Technology*. 2019. Vol. 342. P. 698-713. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.039>
17. Yelemes D., Yessentay D., Rustemov I., Bekturganova N., Shogelova N., Kazhetaev A., Kossenko I. Innovative Spiral Vibrating Screen for High-Quality Cubical Crushed Stone: Design and Validation // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 19. Article 10339. <https://doi.org/10.3390/app151910339>
18. Chen W., Jin R., Xu Y., Wanatowski D., Li B., Yan L., Pan Z., Yang Y. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: a review of the scientific literature // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 218. P. 483-496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.130>
19. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
20. СТ РК 1549-2006. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и щебень для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. - Астана: Госстандарт, 2006.
21. СН РК 3.03-01-2013. Автомобильные дороги. - Строительные нормы Республики Казахстан.
22. СП РК 3.03-101-2013*. Автомобильные дороги. - Свод правил Республики Казахстан. - С изменениями.
23. СН РК 3.03-04-2014*. Проектирование дорожных одежд нежесткого типа. - Строительные нормы Республики Казахстан.
24. СП РК 3.03-104-2014*. Проектирование дорожных одежд нежесткого типа. - Свод правил Республики Казахстан.

References

1. Iverson, R.M. The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics* 1997, 35(3), 245-296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>.
2. Takahashi, T. *Debris Flow: Mechanics, Prediction, and Countermeasures*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014. <https://doi.org/10.1201/b16647>.
3. Iverson, R.M. Debris flows: Behaviour and hazard assessment. *Geology Today* 2014, 30(1), 15–20. <https://doi.org/10.1111/gto.12037>.
4. Medeu, A.R.; Popov, N.V.; Blagoveshchenskiy, V.P.; Askarova, M.A.; Medeu, A.A.; Ranova, S.U.; Kamalbekova, A.; Bolch, T. Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan. *Earth-Science Reviews* 2022, 229, 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>.
5. Zaginaev, V.; Petrakov, D.; Erokhin, S.; Meleshko, A.; Stoffel, M.; Ballesteros-Cánovas, J.A. Geomorphic control on regional glacier lake outburst flood and debris flow activity over

- northern Tien Shan. *Global and Planetary Change* 2019, 176, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.003>.
6. Yafyazova, R.K. Disastrous debris flows connected with glacial processes and defense methods against them in Kazakhstan. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 2011, Special Issue, 1101-1110. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-119>.
 7. Shahgedanova, M.; Saidaliyeva, Z.; Mussina, A.; Kapitsa, V.; Raimbekova, Z.; Donskikh, D.; Kissebayev, D.; Kasenov, M.; Petrov, M. Debris flows in the northern Tien Shan, Central Asia: Regional database, meteorological triggers, and trends. *npj Natural Hazards* 2024, 1, 49. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00050-7>.
 8. Cundall, P.A.; Strack, O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* 1979, 29(1), 47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>.
 9. Coetzee, C.J.; Els, D.N.J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling. *Computers and Electronics in Agriculture* 2009, 65(2), 198-212. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.10.002>.
 10. Coetzee, C.J.; Basson, A.H.; Vermeer, P.A. Discrete and continuum modelling of excavator bucket filling. *Journal of Terramechanics* 2007, 44(2), 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2006.07.001>.
 11. 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>.
 12. Shmulevich, I. State of the art modeling of soil–tillage interaction using discrete element method. *Soil and Tillage Research* 2010, 111(1), 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.003>.
 13. Guo, Y.; Curtis, J.S. Discrete Element Method simulations for complex granular flows. *Annual Review of Fluid Mechanics* 2015, 47, 21-46. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014644>.
 14. Li, J.; Webb, C.; Pandiella, S.S.; Campbell, G.M. Discrete particle motion on sieves-a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technology* 2003, 133(1-3), 190-202. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00092-5).
 15. Elskamp, F.; Kruggel-Emden, H. Review and benchmarking of process models for batch screening based on discrete element simulations. *Advanced Powder Technology* 2015, 26(3), 679-697. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.11.001>.
 16. Elskamp, F.; Kruggel-Emden, H. Extension of process models to predict batch screening results under the influence of moisture based on DEM simulations. *Powder Technology* 2019, 342, 698-713. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.039>.
 17. Yelemes, D.; Yessentay, D.; Rustemov, I.; Bekturganova, N.; Shogelova, N.; Kazhetaev, A.; Kossenko, I. Innovative Spiral Vibrating Screen for High-Quality Cubical Crushed Stone: Design and Validation. *Applied Sciences* 2025, 15(19), 10339. <https://doi.org/10.3390/app151910339>.
 18. Chen, W.; Jin, R.; Xu, Y.; Wanatowski, D.; Li, B.; Yan, L.; Pan, Z.; Yang, Y. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature. *Construction and Building Materials* 2019, 218, 483-496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.130>.
 19. GOST 8267-93. *Crushed Stone and Gravel from Dense Rocks for Construction Works. Technical Specifications*. Interstate Standard, 1993.
 20. ST RK 1549-2006. *Crushed Stone-Gravel-Sand Mixtures and Crushed Stone for Pavements and Bases of Roads and Airfields. Technical Specifications*. Astana, Kazakhstan: Gosstandart, 2006.
 21. SN RK 3.03-01-2013. *Motor Roads*. Construction Standards of the Republic of Kazakhstan, 2013.
 22. SP RK 3.03-101-2013*. *Motor Roads*. Code of Practice of the Republic of Kazakhstan, as amended.

23. SN RK 3.03-04-2014*. *Design of Flexible Pavements*. Construction Standards of the Republic of Kazakhstan, as amended.
24. SP RK 3.03-104-2014*. *Design of Flexible Pavements*. Code of Practice of the Republic of Kazakhstan, as amended.