

УДК (UDC) 621.86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
МОБИЛЬНОГО СВОДООБРУШИТЕЛЯ В БУНКЕРЕEXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS FOR A
MOBILE ARCH-BREAKER IN A HOPPERКожевников В.А.
Kozhevnikov V.A.Приволжский государственный университет путей сообщения (Самара, Россия)
Volga State University of Railway Engineering (Samara, Russia)

Аннотация. Проведено комплексное исследование работы мобильного сводообрушителя-очистителя, предназначенного для разрушения сводов и очистки стенок бункеров от трудносыпучих материалов. Актуальность исследования обусловлена значительными эксплуатационными проблемами, связанными с зависанием и сводообразованием сыпучих материалов в бункерных устройствах различной конструкции. В работе проанализированы стационарные системы сводообрушения и обоснована целесообразность применения мобильных устройств селективного действия, особенно для бункеров сложной геометрии и при частой смене типов хранимых материалов. Разработана оригинальная методика экспериментальных исследований, позволяющая оценивать эффективность работы устройства в зависимости от его конструктивных параметров и схемы применения. В ходе экспериментов установлено критическое влияние длины рабочего органа и последовательности активации технологических отверстий на полноту выгрузки пшеничных отрубей. Доказано, что использование схемы с последовательной активацией противоположных отверстий обеспечивает более эффективное опорожнение бункера. Определена оптимальная длина рабочего органа, обеспечивающая максимальную зону воздействия на материал и полную выгрузку. Полученные результаты позволяют разрабатывать оптимизированные конструкции мобильных сводообрушителей и эффективные технологии их применения для различных типов бункеров и материалов.

Ключевые слова: сводообрушитель, бункер, сводообразование, трудно сыпучий материал

Дата получения статьи: 25.11.2025
Дата принятия к публикации: 25.01.2026
Дата публикации: 25.03.2026

Сведения об авторе:

Кожевников Вадим Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вагонное хозяйство и наземные транспортные комплексы», ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения»,
e-mail: v_a_kozhevnikov@bk.ru.

Abstract. A comprehensive study was conducted on the operation of a mobile arch-breaker and cleaner designed for destroying vaults and cleaning the walls of hoppers from cohesive bulk materials. The relevance of the study is driven by significant operational problems associated with the hang-up and arching of bulk materials in hopper devices of various designs. The paper analyzes stationary arch-breaking systems and substantiates the feasibility of using selective-action mobile devices, especially for hoppers with complex geometry and frequent changes in the types of stored materials. An original methodology for experimental research has been developed, allowing for the evaluation of the device's efficiency depending on its design parameters and application scheme. The experiments established the critical influence of the working tool length and the activation sequence of technological holes on the completeness of wheat bran unloading. It was proven that using a scheme with sequential activation of opposite holes ensures more effective hopper emptying. The optimal length of the working tool was determined, ensuring the maximum impact zone on the material and complete unloading. The obtained results enable the development of optimized designs for mobile arch-breakers and effective technologies for their application for various types of hoppers and materials.

Keywords: arch breaker, hopper, arching, hard-to-loose material.

Date of manuscript reception: 25.11.2025
Date of acceptance for publication: 25.01.2026
Date of publication: 25.03.2026

Author's information:

Vadim A. Kozhevnikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department «Forestry and Land Transport Complexes» at Volga State University of Railway Engineering,
e-mail: v_a_kozhevnikov@bk.ru.

1. Введение

Качественная разгрузка и очистка стенок бункеров и кузовов транспортных средств, используемых для широкой номенклатуры трудно сыпучих материалов с выраженными адгезионными свойствами, вызвана систематическим формированием их отложений на внутренних поверхностях. Данные отложения дестабилизируют процесс разгрузки, со временем подвергаются порче и трудно поддаются удалению.

Стабильность выпуска материала из бункерной емкости может нарушаться под влиянием микроклиматических условий, применяемой технологии погрузочно-разгрузочных работ, физико-механических параметров материала, а также формы и габаритов бункера. Результатом сводообразования становится сокращение полезного объема, что влечет за собой повышение энергетических затрат на выгрузку при использовании специальных механизмов, уменьшение ресурса конструкций и снижение качества хранимого продукта.

Предпринято множество попыток создания теоретических методик, позволяющих комплексно исследовать факторы, влияющие на динамику выгрузки материалов из бункера. Эти методики учитывают не только физико-механические свойства материалов и условия окружающей среды, но и взаимосвязь конструктивно-режимных параметров бункера и интегрированного в него стационарного сводообразователя [1, 2].

Контроль сводообразования и стимулирование гравитационного способа истечения может быть осуществлен с помощью технологий предотвращения сегрегации частиц при загрузке бункера. Однако они в большей степени подходят для высоких силосных хранилищ [3, 4].

Обширные исследования проведены в области оптимизации энергоемкости комбинированного гравитационно-принудительного процесса разгрузки щелевых бункеров с использованием скребковых питателей [5-7]. Эксперименты на бункерном устройстве, рабочий орган которого расположен в щелевом отверстии между подъемным кольцевым зат-

вором и косвенной заслонкой, позволили обосновать режимы энергосбережения предлагаемого способа выгрузки материала, сочетающего в себе гравитационное истечение с принудительным боковым выносом [8].

С помощью кольцевого сдвигового испытателя «Jenike (RST)» изучено влияние отдельных физико-механических свойств трудно-сыпучих материалов на процесс их истечения из бункера. В частности, получены критические уровни влажности отрицательно влияющие на свойства текучести материала при его взаимодействии с различными материалами футеровки внутренней поверхности бункера [9].

Метод дискретных элементов (DEM) широко себя зарекомендовал при моделировании сводообразования и процесса выгрузки тонкодисперсных материалов. Изучение поведения материала, истекающего из бункера под действием вибрации, а также измерение пропускной способности выпускного отверстия бункера производилось на основе анализа полученных с помощью экспериментальной установки фото-изображений сводов [10].

При рассмотрении бункера с плоским днищем, исследование перехода сыпучего материала из слежавшегося состояния в стабильно текучее может производиться с помощью стеклянных шариков разного калибра [11].

На основе уравнения текучести Мора-Кулона удалось получить математическую модель двумерного свода, представленную уравнениями баланса вертикальных и горизонтальных напряжений хранимого в бункере сыпучего материала в плоской системе координат. Решение этих уравнений с использованием численного способа Эйлера позволяет для конкретных условий хранения сыпучего груза прогнозировать форму кривой свода и устанавливать ее взаимосвязь с габаритами конического бункера и критическими размерами его выпускного отверстия [12].

Установлено, что при введении в основной хранимый в бункере материал некоторого количества мелкодисперсных частиц с низким коэффициентом трения, снижает интенсивность сводообразования и ускоряет выпуск материала. По мере увеличения доли

мягких частиц в смеси увеличивается скорость потока, характер которого приобретает лавинообразность и прерывистость. Образующиеся при этом своды имеют временный характер, саморазрушаются и не вызывают тотального блокирования потока выпускаемого материала [13].

С целью улучшения качества выгрузки и обеспечения сохранности транспортируемых и хранимых материалов целесообразно либо проектировать новые бункеры с улучшенными характеристиками, либо проводить модернизацию действующих сооружений. Модернизация заключается в оснащении зоны сводообразования локальными устройствами, обеспечивающими выгрузку слежавшихся масс без нарушения целостности основных конструктивных элементов. Такой подход в отношении стационарных бункерных емкостей также исключил бы необходимость активного применения негативно влияющих на их конструкции вибрационных или ударных воздействий, что позволило бы избежать срезания отдельных частей выпускных воронок при извлечении сильно слежавшихся материалов и сохранить тем самым целостность конструкций [14].

2. Постановка задачи

Представленные в анализе исследования [1–13] касаются в основном бункеров, которые могут быть оборудованы стационарными сводообрушающими устройствами, разнообразная система конструкций которых к настоящему времени разработана и внедрена [15]. Однако, при использовании подобных механизмов, известен ряд ограничений: сохранение зон с материалом, зависающим в углах бункера; возникновение динамического сводообразования после разрушения статического свода и возобновления истечения материала из бункера; невозможность локального воздействия на зоны вероятного слеживания материалов. Данные проблемы особенно критичны для эксплуатирующихся бункеров с корпусами различной геометрии, при частой смене типов хранимых материалов и когда требуется радикальная минимизация энергозатрат при разгрузке.

Таким образом, стационарное размещение сводообрушителей зачастую эффективно только для бункеров с улучшенной геометрией. Поэтому в случае бункеров с несовершенной конструкцией, находящихся в эксплуатации длительное время и демонстрирующих неудовлетворительные показатели выгрузки, предлагается использовать сводообрушители селективного действия с регулируемыми параметрами рабочих органов, способные точно воздействовать на зоны слеживания и исключить производственную необходимость проникновения обслуживающего персонала внутрь бункеров для устранения последствий различного рода осложнений вызванных сводообразованием [14, 16].

Некоторые конструктивные схемы переносных сводообрушителей, конструкции рабочих органов которых варьируются (скрепки, лопасти, многозвенники, цепи и т.п.) продемонстрированы на рис. 1.

Данные устройства обладают высокой производительностью и универсальностью по отношению к различным выгружаемым материалам. Кроме того, они обеспечивают совмещение процесса выгрузки материала с очисткой внутренних поверхностей бункера от налипших остатков, включая вертикальные стенки [17–20]. Привод механизмов может иметь различное исполнение, в том числе быть адаптированным к разнообразному ручному механизированному инструменту, что повышает их технологическую гибкость и расширяет возможности использования.

Возможность использования переносного устройства для устранения возникающих сводообразований и зависаний материалов в труднодоступных местах бункерных емкостей требует экспериментальной проверки. В настоящей статье приведены некоторые результаты исследований переносного сводообрушителя-очистителя с рабочим органом в виде шарнирно сочлененного многозвенника (рис. 1, г) [18].

Рабочий орган устройства может состоять из нескольких шарнирно соединенных звеньев 1 одинаковой длины. Для фиксации звеньев в соосном положении в их сквозные отверстия 2 устанавливается стопорный штырь 5.

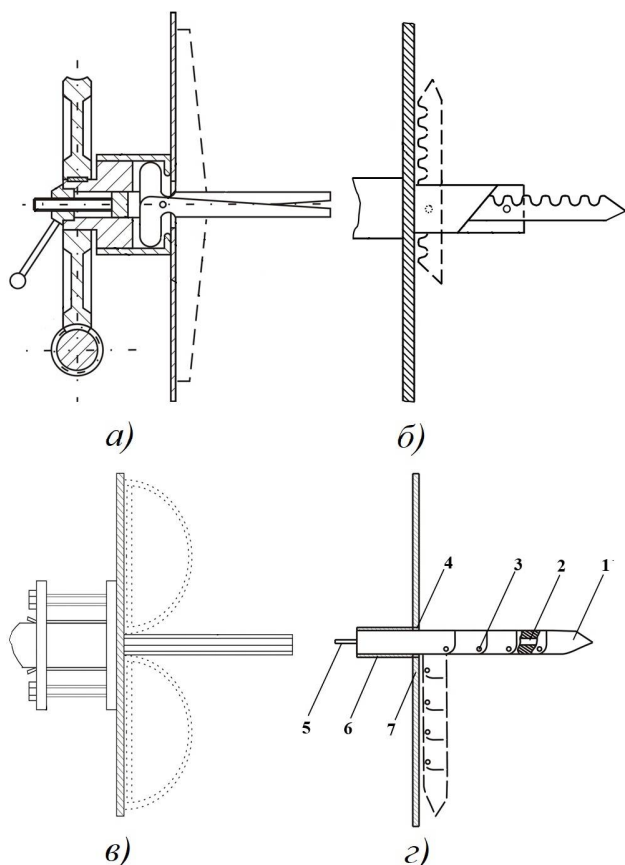


Рис.1. Переносные сводообрушители с различными рабочими органами:
а – скребок; б – зубчатая рейка; в – гибкая лопасть; г – шарнирный многосвязник (1 – звено; 2 – отверстие в звене; 3 – шарнир; 4 – технологическое отверстие в стенке емкости; 5 – стержень; 6 – полый приводной вал; 7 – стенка емкости)

Жесткость собранной конструкции обеспечивается при вводе рабочего органа в технологическое отверстие 4 стенки емкости 7. Концевое звено имеет заостренную форму.

Для изменения конфигурации рабочего органа в требуемом положении производится извлечение штыря 5 из отверстий 2. После этого звенья 1 под действием силы тяжести отклоняются от соосного положения и занимают ориентацию, перпендикулярную оси полого приводного вала 6 (параллельно стенке емкости 7).

3. Материалы и методы

Основные этапы работы представленных выше сводообрушителей в общем виде приведены на рис. 2, а [21]:

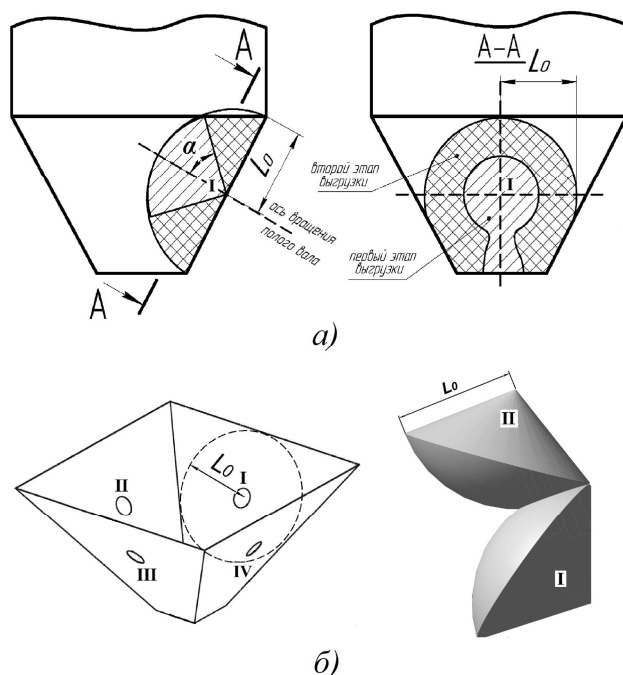


Рис. 2. Технологический процесс: а – схема начального этапа и принудительной выгрузки через одно технологическое отверстие в бункере; б – расположение отверстий (I, II, III, IV) и объемная визуализация зоны воздействия рабочих органов на материал при использовании двух отверстий (I, II) в смежных стенках воронки

1) начальное взаимодействие: рабочие органы плавно отклоняются на угол α , входя в контакт с материалом (это приводит к образованию зоны разрыхления, где давление постепенно нарастает, и начинается первоначальная выгрузка материала);

2) принудительная выгрузка: дальнейшее отклонение рабочих органов на угол, превышающий α , вплоть до контакта со стенкой бункера (это обеспечивает принудительное удаление материала из сформированной зоны);

3) очистка стенок: на заключительном этапе рабочие органы, взаимодействуя со стенкой, удаляют образовавшиеся адгезионные отложения.

Исследования проводились на лабораторной модели стационарного бункера (рис. 3, а). Главным изучаемым конструктивным параметром переносного сводообрушителя выступает длина его рабочего органа. При этом главным критерием эффективности процесса считается полное отсутствие остат-

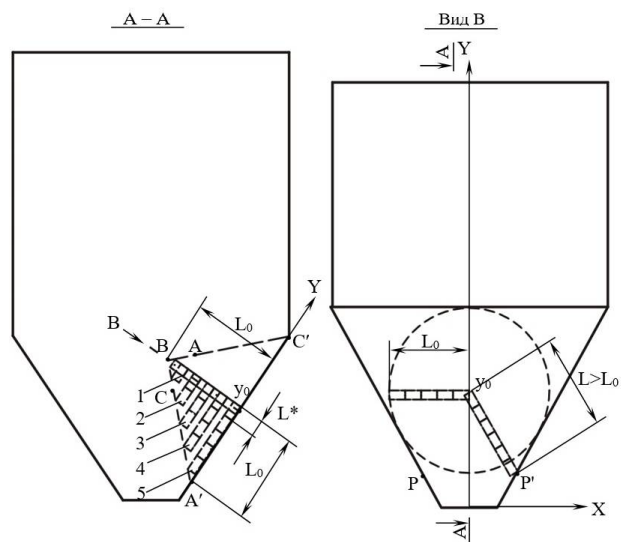
ков материала в бункере после выгрузки. Для проведения эксперимента по сводообрушению бункер площадью 1 м^2 заполнялся материалом на уровень 1 м , что было достаточно для формирования сводов, устойчивость которых подтверждалась визуально. В качестве материала использовались отруби (угол внутреннего трения $\beta=35^\circ$, коэффициент внешнего трения $f=0,5$, насыпная плотность $\rho=400 \text{ кг/м}^3$) в соответствии с ГОСТ 7169-2017 [22].

Для определения оптимальных точек приложения механических воздействий на свод в стенках разгрузочной воронки бункера было выполнено несколько технологических отверстий, идентичных по своему расположению относительно выпускного отверстия (координаты: $x_0=0 \text{ м}$; $y_0=0,47 \text{ м}$), что показано на рис. 2, б. Исследуемая конструкция рабочего органа состояла из пяти звеньев. Последовательным извлечением штыря из пазов первого, второго и последующих звеньев фиксировались пять различных положений (1, 2, 3, 4, 5), обозначенных на рис. 3, б пунктиром и ориентируемых параллельно стенкам емкости. Данная схема позволяет при вращении приводного вала постепенно разрыхлять материал в зоне, ограниченной конической поверхностью (на сечении А–А представленной треугольником ABC). В процессе вращения все звенья, участвующие в разрыхлении, занимают конечное положение, перпендикулярное валу.

После включения в работу конечного звена рабочий орган принимает положение, обеспечивающее контакт с поверхностью стенки разгрузочной воронки, что позволяет очистить ее от налипших остатков материала. Зона очистки соответствует окружности, вписанной в трапециевидную плоскость стенки воронки. Как показано на виде В, для эффективной очистки длина рабочего органа не должна превышать значение $L_0=0,26 \text{ м}$. При использовании органа длиной $L > L_0$ его движение по очищаемой поверхности будет заблокировано смежными стенками в точках Р и Р', что сделает очистку невозможной.



а)



б)

Рис. 3. Экспериментальный бункер:
а – внешний вид; б – схема расположения ра-бочих органов (1, 2, 3, 4, 5 – их соответствующие положения)

Основной задачей экспериментальной части исследования было установление влияния трех ключевых факторов на полноту опорожнения бункера: количества технологических отверстий, порядка их задействования и длины рабочего органа, которая изменялась в диапазоне $L_0=0,065\dots0,26 \text{ м}$. Как видно из рис. 2, б, размещение технологических отверстий по центру каждой стенки разгрузочной воронки позволяет рабочему органу при любой длине L_0 полностью контактировать с поверхностью стенки, обеспечивая её эффективную очистку. Конфигура-

ция с одним отверстием на каждую стенку воронки обусловлена симметричным формированием свода относительно центрального сечения бункерного устройства.

4. Результаты исследований и их анализ

Экспериментально подтверждено, что расположение на одной стенке нескольких отверстий приводит лишь к частичному разрушению свода, не обеспечивая полной выгрузки материала из бункера.

Для оценки эффективности работы сводообрушителя были испытаны две схемы последовательного подключения технологических отверстий:

1) схема (I–II–III): первоочередное последовательное использование двух смежных отверстий (I, II) не позволило достичь полной выгрузки материала (рис. 4);

2) схема (I–III–II): первоочередное последовательное использование двух противоположных отверстий (I, III) обеспечило полное опорожнение бункера после задействования всех трех точек (рис. 5).

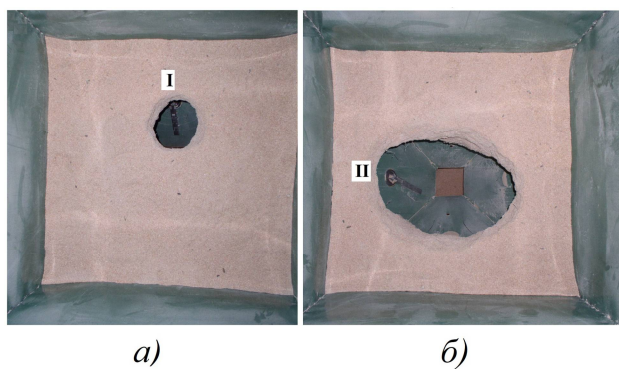


Рис. 4. Результаты работы сводообрушителя по схеме (I–II–III): а – использование первого по очереди отверстия (I); б – использование второго по очереди отверстия (II)

Ключевое различие наблюдается при использовании второго по очереди отверстия, о чем свидетельствуют сравниваемые изображения на рис. 4, б и 5, а. В первом варианте (рис. 4, б) второе используемое отверстие (II) расположено смежно с первым (I), что дает минимальный эффект выгрузки. Во втором варианте, вторым по счету подключается

противоположное отверстие (III) вместо смежного (II), в результате обеспечивается более значительное разрушение свода.

Количественные результаты для эффективной схемы (I–III–II) представлены на рис. 6, а. На графике видна прямая зависимость: с ростом длины рабочего органа L_0 увеличивается и объем выгруженного материала M . Максимальная эффективность (полная выгрузка) достигается при длине $L_0=0,26$ м.

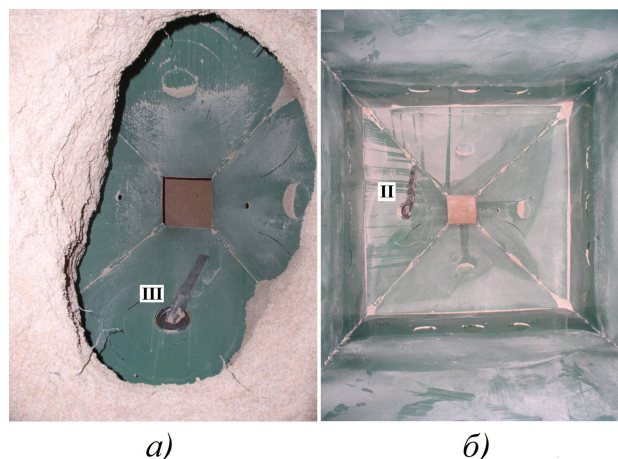


Рис. 5. Результаты работы сводообрушителя по схеме (I–III–II): а – использование второго по очереди отверстия (III) при неполном опорожнении бункера; б – результат использования третьего отверстия (II) при полном опорожнении

При этом энергозатраты W на процесс также возрастают с увеличением длины рабочего органа – с 0,41 кДж до 4,8 кДж (рис. 6, б). Однако, как демонстрирует серая зона на рис. 6, а, определяющим критерием для выбора рациональной длины является не энергоэффективность, а полнота опорожнения бункера. Таким образом, оптимальная длина рабочего органа была установлена на уровне $L_0=0,26$ м.

Сравнение графиков на рис. 6, б демонстрирует схожий характер изменения энергозатрат W и объема V зоны воздействия рабочих органов. Эта параллель указывает на прямую зависимость между длиной рабочих органов и энергоемкостью процесса разрыхления. Аналогичным образом, рост объема выгружаемого материала от 0 до 0,11 м³ объясняется увеличением зоны обработки при

использовании более длинных рабочих органов. При этом оптимальной длиной, обеспечивающей максимальную полноту опорожнения бункера, остается значение $L_0 = 0,26$ м.

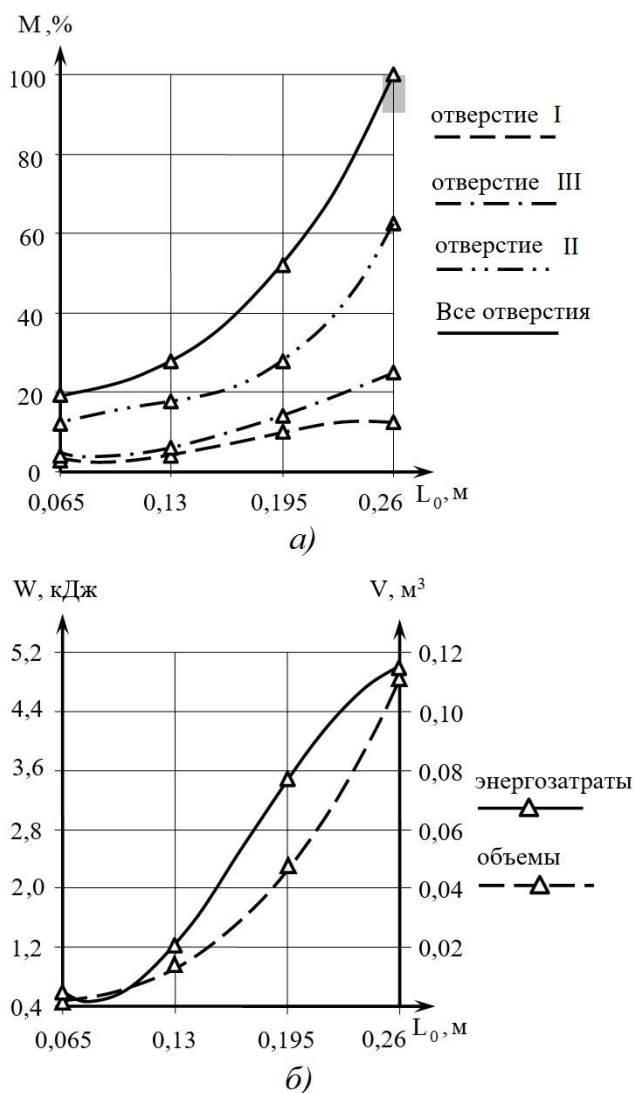


Рис. 6. Влияние длины рабочих органов L_0 :
а – на полноту разгрузки M , %;
б – на энергозатраты W , кДж и на объем взаимодействия V , м³

5. Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало высокую эффективность применения мобильного устройства для решения проблемы сводообразования и зависания

трудно сыпучих материалов в бункерах. Разработанная методика экспериментальных исследований позволила не только оценить эксплуатационные характеристики устройства, но и установить количественные зависимости между его ключевыми конструктивными параметрами и эффективностью процесса выгрузки.

Экспериментально доказано, что на полноту опорожнения бункера критическое влияние оказывают три основных фактора: длина рабочего органа, количество и расположение технологических отверстий, а также последовательность их использования. Определена оптимальная длина рабочего органа, который будучи шарнирным многозвенником гарантирует максимальный охват зоны воздействия на материал и полное опорожнение бункера. Установлено, что исследуемый сводообрушитель позволяет точно воздействовать на проблемные зоны, включая труднодоступные участки и углы бункера, где традиционные стационарные системы часто оказываются неэффективными. Это особенно актуально для бункеров сложной геометрии.

Полученные результаты имеют существенную практическую значимость. Они позволяют разрабатывать оптимизированные конструкции мобильных сводообрушителей и формировать эффективные регламенты их применения для различных типов бункеров и материалов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию методики для других классов сыпучих материалов, а также на интеграцию систем автоматического управления для оптимизации последовательности и интенсивности воздействия рабочего органа. Внедрение таких разработок позволит значительно повысить надежность и экономическую эффективность процессов хранения и выгрузки сыпучих продуктов в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Зацаринная И.А. Совершенствование процесса выгрузки зерновых материалов из бункеров зерноочистительных комплексов: монография. Уфа: ООО «Аэтерна», 2023. 236 с.
2. Богомягих В.А. Теория эквивалентного динамического свода в механике дискретных сыпучих тел. Зерноград: Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия, 2007. 63 с.
3. Третьяков Г.М., Прусов М.В., Денисов В.В., Кононов И.И. Экспериментальные исследования хранилища сыпучих грузов в транспортно-технологических комплексах // Вестник транспорта Поволжья. 2020. №5 (83). С. 56-61.
4. Денисов В.В., Кононов И.И., Прусов М.В. Управление процессами загрузки, хранения и выгрузки зерновых грузов в транспортно-складских комплексах // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 2 (99). С. 60-65. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-2-6.
5. Варгунин В.И., Горюшинский В.С., Варламов А.В., Варламова Н.Х. Теория и практика применения щелевых бункеров на железнодорожном транспорте и в агропромышленном комплексе. Самара: СНЦ РАН, 2007. 107 с.
6. Косяненко А.А., Толпекин С.А. Теоретические исследования процесса дозированного выпуска труднсыпучих компонентов комбикорма из бункера с кольцевым затвором // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2009. № 4. С. 113-119.
7. Туртыгина Н.А. Возможность применения в технологической схеме внутрирудничной предконцентрации руды бункера щелевого типа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 8. С. 82-92. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-8-0-82.
8. Прусов М.В., Денисов В.В., Кононов И.И. Ресурсосбережение в транспортно-складских комплексах при эксплуатации бункерных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 121-125. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-121-122.

References

1. Zatsarinnyaya I.A. *Sovershenstvovanie protsessa vygruzki zernovykh materialov iz bunkerov zernoochistitelnykh kompleksov* [Improving the process of unloading grain materials from bunkers of grain cleaning complexes]. Ufa, OOO Aeterna, 2023. 236 p. (In Russian)
2. Bogomyagkikh V.A. *Teoriya ekvivalentnogo dinamicheskogo svoda v mekhanike diskretnykh sypushikh tel* [The theory of the equivalent dynamic arch in the mechanics of discrete bulk bodies]. Zernograd, Azovo-Chernomorskaya gosudarstvennaya agroinzhenernaya akademiya, 2007. 63 p. (In Russian)
3. Tretyakov G.M., Prusov M.V., Denisov V.V., Kononov I.I. Experimental studies of a bulk cargo storage in transport and technological complexes. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2020, no. 5 (83), pp. 56-61. (In Russian)
4. Denisov V.V., Kononov I.I., Prusov M.V. Management of processes of loading, storage and unloading of grain cargoes in transport and warehouse complexes. *Mir transporta*, 2022, vol. 20, no. 2 (99), pp. 60-65. doi: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-2-6>. (In Russian)
5. Vargunin V.I., Goryushinsky V.S., Varlamov A.V., Varlamova N.Kh. *Teoriya i praktika primeneniya shchelevykh bunkerov na zheleznodorozhnom transporte i v agropro-myshlennom komplekse* [Theory and practice of using slot bunkers in railway transport and agro-industrial complex]. Samara, SNC RAN, 2007. 107 p. (In Russian)
6. Kosenenko A.A., Tolpekin S.A. Theoretical studies of the process of dosed release of bulk components of compound feed from a bunker with a ring gate. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*, 2009, no. 4, pp. 113-119. (In Russian)
7. Turtygina N.A. The possibility of using a slot-type hopper in the technological scheme of in-mine ore pre-concentration. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal)*, 2021, no. 8, pp. 82-92. doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-8-0-82>. (In Russian)
8. Prusov M.V., Denisov V.V., Kononov I.I. Resource saving in transport and warehouse complexes during the operation of bun-

9. Reddy Y.V., Venkatesh S. Flow characteristic evaluation of iron ore for design of bunkers and chutes with different liner materials // *Materials today: Proceedings*. 2023. Vol. 76. No. 1. Pp. 95-102. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.10.132.
10. Zhu J., Wang K., Ma Y., Xu W., Long J., Li X. Arch formation mechanism and discharge process of cohesive fine powder in a vibrated silo // *Particuology: Science and Technology of Particles*. 2024. Vol. 94. Pp. 373-385. DOI: 10.1016/j.partic.2024.09.001.
11. Xue J., Schiano S., Zhong W., Chen L., Wu C.-Y. Determination of the flow/no-flow transition from a flat bottom hopper // *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*. 2019. Vol. 358. Pp. 55-61. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.08.063.
12. Matchett A.J. The shape of the cohesive arch in hoppers and silos – Some theoretical considerations // *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*. 2007. Vol. 171. No. 3. Pp. 133-145. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.10.010.
13. Alborzi S., Hashmi S.M. Low-friction soft particles add intermittency and avalanches to the flow of rigid particles in a hopper // *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*. 2025. Vol. 459. Pp. 121000.
14. Денисов В.В., Кожевников В.А. Устройства для выпуска трудносыпучих материалов из силосов // *Комбикорма*. 2001. № 5. С. 17.
15. Кожевников В.А., Астраханский А.Ю., Жданов А.Г. Классификация сводообрушающих средств механизации выгрузки трудносыпучих грузов // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2020. №5. С. 56-58. DOI: 10.26160/2541-8637-2020-5-56-58.
16. Кожевников В.А., Жданов А.Г., Астраханский А.Ю. Результаты производственных испытаний переносного устройства обрушения сводов в бункерах // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2022. № 12. С. 10-12. DOI: 10.26160/2309-8864-2022-12-10-12.
- ker systems. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2024, no. 7, pp. 121-125. doi: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-7-121-122>. (In Russian)
9. Reddy Y.V., Venkatesh S. Flow characteristic evaluation of iron ore for design of bunkers and chutes with different liner materials. *Materials today: Proceedings*, 2023, vol. 76, no. 1, pp. 95-102. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.10.132.
10. Zhu J., Wang K., Ma Y., Xu W., Long J., Li X. Arch formation mechanism and discharge process of cohesive fine powder in a vibrated silo. *Particuology: Science and Technology of Particles*, 2024, vol. 94, pp. 373-385. DOI: 10.1016/j.partic.2024.09.001.
11. Xue J., Schiano S., Zhong W., Chen L., Wu C.-Y. Determination of the flow/no-flow transition from a flat bottom hopper. *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*, 2019, vol. 358, pp. 55-61. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.08.063.
12. Matchett A.J. The shape of the cohesive arch in hoppers and silos – Some theoretical considerations. *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*, 2007, vol. 171, no. 3, pp. 133-145. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.10.010.
13. Alborzi S., Hashmi S.M. Low-friction soft particles add intermittency and avalanches to the flow of rigid particles in a hopper. *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*, 2025, vol. 459, pp. 121000.
14. Denisov V.V., Kozhevnikov V.A. Devices for unloading bulk materials from silos. *Kombikorma*, 2001, no. 5, p. 17. (In Russian)
15. Kozhevnikov V.A., Astrakhsansky A.Yu., Zhdanov A.G. Classification of arch-breaking means of mechanization of unloading of bulk cargoes. *Mekhatronika, avto-matizatsiya i robototekhnika*, 2020, no. 5, pp. 56-58. doi: <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-5-56-58>. (In Russian)
16. Kozhevnikov V.A., Zhdanov A.G., As-

17. Переносной сводоразрушитель-очиститель / Г.М. Третьяков. - Патент РФ на изобретение № 2190486. Заявл. 04.10.2000, № 2000124913. Оpubл. 10.10.2002. Бюл. № 28.

18. Сводоразрушитель-очиститель / Г.М. Третьяков, Е.П. Дудкин, В.С. Горюшинский, И.В. Горюшинский, Е.В. Горюшинская. - Патент РФ на изобретение № 2191078. Заявл. 19.04.2001, № 2001110578. Оpubл. 20.10.2002. Бюл. № 29.

19. Переносной сводоразрушитель-очиститель / Г.М. Третьяков, В.С. Горюшинский, И.В. Горюшинский, В.Л. Шур, В.А. Кожевников. - Патент РФ на изобретение № 2201813. Заявл. 23.01.2001, № 2001102165. Оpubл. 10.04.2003. Бюл. № 10.

20. Сводоразрушитель-очиститель / А.Г. Жданов, В.А. Кожевников. - Патент РФ на полезную модель № 179833. Заявл. 03.11.2016, № 2016143492. Оpubл. 25.05.2018. Бюл. № 15.

21. Кожевников В.А. Исследование конструктивно-режимных параметров переносного механического сводообрушителя // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2024. № 4. С. 276-285. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-04-276-285.

22. ГОСТ 7169-2017. Отруби пшеничные. Технические условия. Введ. 2019-01-01. М.: Стандартиформ, 2017. 8 с.

trakhansky A.Yu. Results of field tests of a portable device for collapsing arches in bunkers. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*, 2022, no. 12, pp. 10-12. doi: <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2022-12-10-12>. (In Russian)

17. Patent RU 2190486. *Perenosnoy svodorazrushitel-ochistitel* [Portable arch-breaker and cleaner]. Tretyakov G.M. Declared 04.10.2000. Published 10.10.2002. (In Russian)

18. Patent RU 2191078. *Svodorazrushitel-ochistitel* [Arch-breaker and cleaner]. Tretyakov G.M., Dudkin E.P., Goryushinsky V.S., Goryushinsky I.V., Goryushinskaya E.V. Declared 19.04.2001. Published 20.10.2002. (In Russian)

19. Patent RU 2201813. *Perenosnoy svodorazrushitel-ochistitel* [Portable arch-breaker and cleaner]. Tretyakov G.M., Goryushinsky V.S., Goryushinsky I.V., Shur V.L., Kozhevnikov V.A. Declared 23.01.2001. Published 10.04.2003. (In Russian)

20. Patent RU 179833. *Svodorazrushitel-ochistitel* [Arch-breaker and cleaner]. Zhdanov A.G., Kozhevnikov V.A. Declared 03.11.2016. Published 25.05.2018. (In Russian)

21. Kozhevnikov V.A. Research of design and operational parameters of a portable mechanical arch breaker. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2024, no. 4, pp. 276-285. doi: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2024-10-04-276-285>. (In Russian)

22. GOST 7169-2017. *Wheat bran. Technical conditions*. Moscow, Standartinform, 2017. 8 p. (In Russian)