

Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 22. Is. 2. Number 86 (2025). Pp. 44–56  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.004>  
УДК 621.892.09

## IMPROVING THE QUALITY OF OPERATION OF A MOBILE CRUSHER IN A BUNKER FOR STORING SOLID MATERIALS

*V. Perevertov<sup>1\*</sup>, G. Afanasev<sup>2</sup>, M. Abulkasimov<sup>2</sup>, M. Akayeva<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Samara State University of Railways and Communications, Samara, Russian Federation;

<sup>2</sup>Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup>International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [prkom@samgups.ru](mailto:prkom@samgups.ru)

**Valeriy Perevertov** — candidate of Technical Sciences, Samara State University of Railways and Communications, Samara, Russian Federation

E-mail: [prkom@samgups.ru](mailto:prkom@samgups.ru), <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

**Gennady Afanasev** — candidate of Technical Sciences, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation

E-mail: [afanasyev-g@yandex.ru](mailto:afanasyev-g@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

**Manas Abulkasimov** — candidate of Technical Sciences, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation

E-mail: [abilkk@mail.ru](mailto:abilkk@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

**Madina Akayeva** — candidate of Technical Sciences, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [akaeva.madina@mtgu.edu.kz](mailto:akaeva.madina@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0008-2866-7831>.

© V. Perevertov, G. Afanasev, M. Abulkasimov, M. Akayeva

**Abstract.** In the context of increasing industrial production and growing demands for the quality of bulk material storage, improving unloading and cleaning technologies of storage bunkers has become highly relevant. Traditional methods of removing cohesive or non-free-flowing materials often fail to ensure complete discharge and require considerable time and labor. This study focuses on the development and justification of a portable vault-breaking device designed for the efficient destruction of material blockages and agglomerates in bulk storage containers. The main objective of the research is to create a rational and universal design of a portable device that provides optimal unloading conditions for various materials, taking into account their physical and mechanical properties. The study tasks included analyzing existing technologies, selecting the most effective working tools, conducting experimental tests, and developing recommendations for design optimization. As a result, a technological process for operating the mobile device has been developed, ensuring complete container unloading and simultaneous cleaning of its walls from residual materials. The optimal parameters of working elements (length, cross-section shape), the number and placement of technological openings in the bunker walls, and suitable materials using both traditional and additive manufacturing methods have been determined. The findings confirm that the implementation of the developed mobile device significantly increases process efficiency, reduces downtime, and lowers maintenance costs. The obtained experimental relationships and theoretical results can serve as a foundation for future research aimed at automation and digital modeling of the vault-breaking process.



**Keywords:** mobile device, vault breaker, bunker, bulk materials, unloading, additive technologies, optimization.

**For citation:** V. Perevertov, G. Afanasev, M. Abulkasimov, M. Akayeva. Improving the quality of operation of a mobile crusher in a bunker for storing solid materials//Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 86. Pp. 44–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.004>

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

## ҚАТТЫ МАТЕРИАЛДАРДЫ САҚТАУҒА АРНАЛҒАН БУНКЕРДЕГІ ЖЫЛЖЫМАЛЫ ҚҰЛАТҚЫШТЫҢ ЖҰМЫС САПАСЫН АРТТЫРУ

*В.П. Перевертов<sup>1\*</sup>, Г. Афанасьев<sup>2</sup>, М.М. Абулкасимов<sup>2</sup>, М.О. Акаева<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Самара мемлекеттік жол және қатынас университеті, Самара, Ресей Федерациясы;

<sup>2</sup>Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей Федерациясы;

<sup>3</sup>Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.  
E-mail: [prkom@samgups.ru](mailto:prkom@samgups.ru)

**Валерий Перевертов** — т.ғ.к., Самара мемлекеттік жол және қатынас университеті, Самара, Ресей Федерациясы

E-mail: [prkom@samgups.ru](mailto:prkom@samgups.ru), <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

**Геннадий Афанасьев** — т.ғ.к., Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей Федерациясы

E-mail: [afanasyev-g@yandex.ru](mailto:afanasyev-g@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

**М. Абулкасимов** — т.ғ.к., Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей Федерациясы, [abilkk@mail.ru](mailto:abilkk@mail.ru)

E-mail: [abilkk@mail.ru](mailto:abilkk@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

**Мадина Акаева** — т.ғ.к., Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [akaeva.madina@mtgu.edu.kz](mailto:akaeva.madina@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0008-2866-7831>.

© В. Перевертов, Г. Афанасьев, М. Абулкасимов, М. Акаева

**Аннотация.** Өндірістік процестердің қарқындауы және сусымалы материалдарды сақтау сапасына қойылатын талаптардың артуы жағдайында бункерлерді түсіру мен тазарту технологияларын жетілдіру ерекше маңызға ие. Дәстүрлі әдістер сусымалы және қиын түсірілетін жүктемелерді толық түсіруге әрдайым мүмкіндік бермейді және көп еңбек пен уақытты қажет етеді. Бұл зерттеу сусымалы материалдарды сақтау сыйымдылықтарындағы тығындарды және агломераттарды тиімді жоюға арналған мобильді сводаобрушитель құрылғысын әзірлеуге бағытталған. Зерттеудің мақсаты – әртүрлі физика-механикалық қасиеттері бар жүктемелерді тиімді түсіруді қамтамасыз ететін әмбебап және ұтымды құрылымды мобильді құрылғы жасау. Осы мақсатқа жету үшін қолданыстағы технологиялар талданды, ең тиімді жұмыс органдары таңдалды, тәжірибелік сынақтар жүргізілді және құрылымды оңтайландыру бойынша ұсыныстар әзірленді. Зерттеу нәтижесінде мобильді құрылғының жұмыс технологиясы жасалды, бұл сыйымдылықтың толық түсірілуін және оның қабырғаларының қалдықтардан бір мезгілде тазартылуын қамтамасыз етеді. Жұмыс органдарының конструкциялық параметрлері, технологиялық тесіктердің оңтайлы орналасуы және дәстүрлі және аддитивті технологиялар негізінде жасалатын материалдар анықталды. Зерттеу нәтижелері әзірленген мобильді құрылғыны енгізу өндірістік процестердің тиімділігін

арттыратынын, жабдықтың бос тұрып қалуын азайтып, қызмет көрсету шығындарын төмендететінін дәлелдейді. Алынған нәтижелер болашақта автоматтандырылған түсіру жүйелерін жасау мен цифрлық модельдеуге негіз бола алады.

**Түйін сөздер:** мобильді құрылғы, сводообрушитель, бункер, сусымалы материалдар, түсіру, аддитивті технологиялар, оңтайландыру.

**Дәйексөздер үшін:** В. Перевертов, Г. Афанасьев, М. Абулкасимов, М. Акаева Қатты материалдарды сақтауға арналған бункердегі жылжымалы құлатқыштың жұмыс сапасын арттыру//Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 86. 44–56 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.004>

**Мүдделер қақтығысы:** Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО СВОДООБРУШИТЕЛЯ В БУНКЕРЕ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ТРУДНОСЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

*В.П. Перевертов<sup>1\*</sup>, М.М. Абулкасимов<sup>2</sup>, Г.И. Афанасьев<sup>2</sup>, М.О. Акаева<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Самарский государственный университет путей и сообщения, Самара, Россия;

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

<sup>3</sup>Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.  
E-mail: [prkom@samgups.ru](mailto:prkom@samgups.ru)

**Валерий Перевертов** — кандидат технических наук, Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация

E-mail: [prkom@samgups.ru](mailto:prkom@samgups.ru), <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

**Геннадий Афанасьев** — кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

E-mail: [afanasyev-g@yandex.ru](mailto:afanasyev-g@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

**Манас Абулкасимов** — кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

E-mail: [abilkk@mail.ru](mailto:abilkk@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

**Мадина Акаева** — кандидат технических наук, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: [akaeva.madina@mtgu.edu.kz](mailto:akaeva.madina@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0008-2866-7831>.

© В. Перевертов, Г. Афанасьев, М. Абулкасимов, М. Акаева

**Аннотация.** В условиях интенсификации производственных процессов и повышения требований к качеству хранения сыпучих материалов особое значение приобретает совершенствование технологий разгрузки и очистки бункеров. Традиционные методы удаления трудносыпучих грузов и налипших остатков не всегда обеспечивают полную выгрузку и часто требуют значительных трудовых и временных затрат. Настоящее исследование посвящено разработке и обоснованию конструкции мобильного сводообрушителя для эффективного разрушения завесаний и агломератов в емкостях хранения сыпучих материалов. Цель работы заключается в создании рациональной и универсальной конструкции переносного устройства, обеспечивающей оптимальные условия выгрузки различных типов грузов с учётом их физико-механических свойств. Для достижения поставленной цели решались задачи анализа существующих технологий, выбора наиболее эффективных рабочих органов, проведения экспериментальных испытаний и выработки рекомендаций по

оптимизации конструкции устройства. В результате исследования разработана технология работы мобильного устройства, позволяющая обеспечить полную выгрузку емкости и одновременную очистку её стенок от налипших остатков. Определены конструктивные параметры рабочих органов (длина, форма, поперечное сечение), оптимальные места установки технологических отверстий в стенках бункера, а также предложены материалы для изготовления рабочих элементов с использованием традиционных и аддитивных технологий. Заключение исследования подтверждает, что внедрение разработанного мобильного устройства способствует повышению производительности и надежности технологических процессов, уменьшению простоев оборудования и затрат на обслуживание. Полученные экспериментальные зависимости и теоретические выводы могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструкций и разработки автоматизированных систем разгрузки. Перспективы дальнейших исследований связаны с цифровым моделированием процессов сводообрушения и адаптацией устройства под различные промышленные условия.

**Ключевые слова:** мобильное устройство, сводообрушитель, бункер, сыпучие материалы, выгрузка, аддитивные технологии, оптимизация.

**Для цитирования:** В. Перевертов, Г. Афанасьев, М. Абулкасимов, М. Акаева. Повышение качества работы мобильного сводообрушителя в бункере для хранения трудносыпучих материалов//Промышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. №. 86. Стр. 44–56. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.004>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Введение.**

Необходимость качественной очистки стенок бункеров и кузовов транспортных средств обусловлена расширением номенклатуры сыпучих материалов, обладающих высокими адгезионными свойствами. При транспортировке таких материалов происходит постепенное накопление остатков (Кожевников, 2023: 49–55), что приводит к образованию на внутренних поверхностях емкости трудноудаляемых налипших слоёв, ухудшающих эксплуатационные характеристики оборудования и приводящих к потере качества хранимого продукта (Денисов, 2001: 17).

Современные условия эксплуатации транспортных и складских систем требуют поиска решений, направленных на повышение эффективности процессов хранения и выгрузки материалов. Расширение ассортимента хранимых и транспортируемых грузов, а также обеспечение их сохранности могут быть достигнуты двумя путями:

- путём создания новых бункеров и вагонов-хопперов, обладающих повышенными функциональными возможностями;

- посредством модернизации существующих емкостей, с внедрением инновационных очистительных и сводоразрушающих устройств (Кожевников, 2023: 49–55; Кожевников, 2009: 43–49).

В настоящей работе рассматривается устройство для очистки внутренних поверхностей полых емкостей, предназначенное для разрушения сводов и перемычек из слежавшихся сыпучих материалов, возникающих в труднодоступных зонах контейнеров и бункеров (Патент 2201813, 2003: 1). Применение данного устройства позволяет повысить скорость обрушения сводов в два раза, устранить причины затруднённого выпуска материала и обеспечить эффективную очистку стенок емкости без необходимости вмешательства обслуживающего персонала внутрь конструкции.

Проблема сводообразования и зависания материала является одной из ключевых в технологии хранения и транспортировки сыпучих грузов. Она обостряется под воздействием микроклиматических факторов производственной среды, особенностей загрузочно-разгрузочных процессов, физико-механических характеристик

материалов, а также геометрии выпускных воронок бункеров (Горюшинский, 2007: 796–800). Возникающие своды уменьшают полезный объём емкости, повышают энергетические затраты на выгрузку и снижают срок службы оборудования, что требует разработки эффективных решений по стабилизации разгрузочного процесса.

Ранее предложенные стационарные устройства для сводаобрушения показали ограниченную универсальность, особенно в случае временных зависаний и разнообразия транспортируемых материалов (Кожевников, 2018: 37–44). Поэтому особое внимание уделяется переносным (мобильным) сводаобрушителям, которые обеспечивают гибкость эксплуатации, высокую производительность и возможность применения как на новых, так и на действующих емкостях (Патент №184049, 2018: 1).

Потребность в подобных устройствах связана с широким диапазоном физико-механических свойств транспортируемых материалов и разнообразием конструкций подвижного состава бункерного типа (Кожевников, 2017: 37–41). Мобильные устройства, представленные на Рисунке 1, различаются типом рабочих органов (скребки, цепные многозвенники, пластинчатые элементы и др.) и обеспечивают высокую универсальность при выгрузке различных материалов (Кожевников, 2023: 50). Одновременно с выгрузкой они выполняют функцию очистки внутренних стенок, включая вертикальные поверхности (Золкин, 2021: 12023).

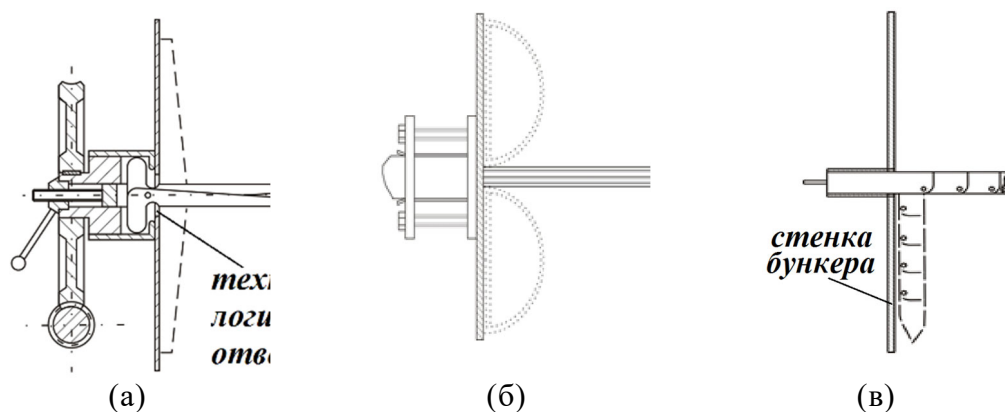


Рис. 1. Мобильные сводаобрушающе-очищающие механизмы с рабочими органами различного типа: скребковый недеформируемый (а); пластинчатый деформируемый (б); шарнирный многозвенник (в) (Кожевников, 2023: 50)

Использование современных композиционных материалов позволяет существенно повысить эффективность работы таких устройств за счёт сочетания лёгкости, прочности и эластичности рабочих органов (Перевертов, 2020а: 100–110). Разнообразие возможных приводов, включая универсальные механизированные инструменты, расширяет технологические возможности и повышает адаптивность устройства к различным условиям эксплуатации.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и надёжности разгрузочных процессов бункерных устройств, минимизации простоев и затрат на техническое обслуживание, а также расширением области применения мобильных сводаобрушителей и очистителей при работе с трудносыпучими материалами (Перевертов, 2020б: 125–136).

Объект исследования – процесс выгрузки и очистки стенок бункеров, предназначенных для хранения и транспортировки сыпучих материалов.

Предмет исследования – переносные (мобильные) устройства сводаобрушения и очистки внутренних поверхностей бункеров.

Цель исследования – разработка и исследование конструкции переносного сводообрушителя-очистителя, обеспечивающего комплексное решение задач выгрузки и очистки.

Задачи исследования включают:

- анализ существующих технологий разгрузки и очистки бункеров;
- определение параметров и принципа действия мобильного устройства;
- экспериментальное исследование эффективности сводообрушения;
- оптимизацию конструктивно-режимных параметров устройства.

Методы исследования основаны на теоретическом моделировании процессов разгрузки, экспериментальном определении параметров функционирования устройства и анализе физико-механических свойств материалов. Гипотеза исследования заключается в предположении, что использование мобильных сводообрушителей с оптимизированными конструктивными параметрами позволит значительно повысить эффективность выгрузки и очистки бункеров, снизить энергозатраты и обеспечить стабильность технологического процесса.

#### **Материалы и методы.**

Исследование направлено на повышение эффективности работы переносного сводообрушителя, применяемого для разрушения сводов в бункерах при хранении трудносыпучих материалов. Основной гипотезой исследования является предположение о том, что оптимизация конструктивно-режимных параметров переносного сводообрушителя позволит повысить интенсивность процесса разрушения сводов и обеспечить более полную выгрузку материала при минимальных энергетических затратах.

Методология исследования сочетает аналитические, расчетные и экспериментальные подходы. На первом этапе были проведены теоретические исследования, основанные на анализе динамических и силовых характеристик взаимодействия рабочих органов устройства с сыпучим материалом. Теоретическая модель учитывала влияние угла разведения рабочих органов ( $\alpha$ ), скорости вращения вала и свойств исследуемого материала, таких как влажность, плотность и коэффициент внутреннего трения.

На втором этапе выполнялись лабораторные и стендовые эксперименты с использованием опытного образца переносного сводообрушителя. Испытания проводились в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. В ходе эксперимента процесс разгрузки трудносыпучих материалов из бункера сопровождался измерением и регистрацией исследуемых параметров — времени разрушения свода, скорости разгрузки, вибрационных характеристик, угла разведения рабочих органов и частоты вращения привода.

В ходе экспериментов выделено три основных этапа работы переносного сводообрушителя (Рис. 2):

Активное рыхление — разведение рабочих органов на некоторый угол  $\alpha$  в противоположные стороны от оси вращения вала, вызывающее локальное повышение напряженности материала и обрушение свода.

Принудительная выгрузка — воздействие рабочих органов на внешнюю зону груза, не задействованную на первом этапе, с целью обеспечения полной разгрузки бункера.

Очистка поверхностей — удаление адгезионных отложений с внутренних стенок бункера за счёт контактного взаимодействия рабочих органов (Перевертов, 2020: 58–60).

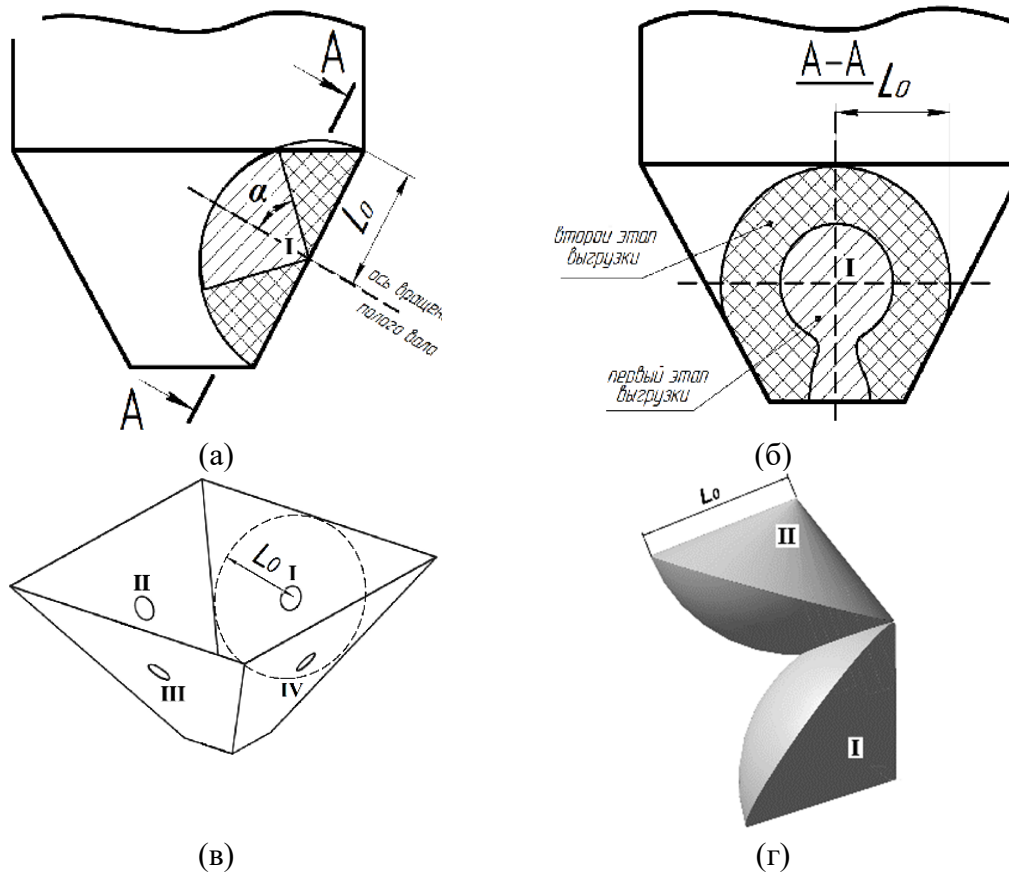


Рис. 2. Технологический процесс сводообрушения с применением экспериментального образца переносного устройства при задействовании только одного технологического отверстия №1 бункерной лабораторной установки: схема процесса выгрузки (а, б); схема расположения технологических отверстий (в); зона воздействия рабочих органов (объемное изображение) на груз без полного их раскрытия при одновременном использовании двух отверстий в соседних смежных стенках выпускной воронки (г) (Кожевников, 2023: 51)

В качестве объекта испытаний использовались трудносыпучие материалы с различными физико-механическими свойствами: влажностью 2–5 %, насыпной плотностью 1,3–1,6 г/см<sup>3</sup> и углом естественного откоса 35–42°. Такой диапазон характеристик позволил смоделировать реальные условия эксплуатации промышленных бункеров и обеспечить достоверность экспериментальных данных.

Методы исследования.

Аналитический метод — для описания закономерностей взаимодействия рабочих органов с материалом и оценки напряжённого состояния в зоне контакта.

Экспериментальный метод — для подтверждения теоретических зависимостей и получения практических данных.

Математическое моделирование — для расчёта оптимальных параметров конструкции и режимов работы устройства.

Статистический анализ — для проверки достоверности полученных результатов с использованием критерия Стьюдента и корреляционного анализа.

Результаты экспериментов позволили сопоставить фактические показатели эффективности с расчётными и подтвердить достоверность предложенной модели. В ходе обработки данных использовались методы вариационной статистики и программный пакет MATLAB, что позволило выявить зависимость между углом разведения рабочих органов и скоростью разрушения сводов.

Таким образом, предложенная методология обеспечивает комплексное изучение проблемы разрушения сводов и создаёт основу для оптимизации конструктивных

параметров переносного сводаобрушителя с учётом свойств трудносыпучих материалов и эксплуатационных условий.

#### **Результаты и обсуждения.**

Данный раздел посвящён анализу полученных экспериментальных данных и их сопоставлению с результатами предыдущих исследований, посвящённых процессам сводообразования и сводообрушения в бункерных системах. На основании проведённой экспериментальной и теоретической работы была установлена зависимость эффективности функционирования переносного сводаобрушителя от конструктивно-режимных параметров и условий взаимодействия рабочих органов с трудносыпучими материалами (Перевертов, 2020б: 96–99).

Исследования (Золкин, 2021: 12023) показали, что для изучения физического процесса сводообрушения оптимальные условия создаются при заполнении бункера грузом на высоту 1 м при площади горизонтального поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>. Такой объём загрузки признан достаточным для проведения экспериментов с материалами, склонными к сводообразованию, но обладающими малой удельной массой. В данной работе лабораторный бункер был сконструирован именно с такими параметрами, что позволило обеспечить корректность воспроизведения процессов, происходящих в промышленных условиях (Кожевников, 2023: 49–55).

Пропускная способность лабораторного образца бункера определялась через измерение времени выпуска и массы выгруженного материала. В ходе эксперимента установлено, что разгрузка через выпускное отверстие сопровождается одновременным проявлением процессов сводообразования и сводообрушения (динамические своды), аналогично наблюдениям в работах (Жданов, 2019: 96–100). Стабильный выпуск груза наблюдается только при доминировании процесса обрушения над процессом образования сводов; в противном случае формируются устойчивые статические своды, приводящие к полной остановке разгрузки (Жданов, 2018: 1).

Оптимизация конструктивно-режимных параметров переносного сводаобрушителя возможна при установлении зависимости времени выгрузки материала от длины и расположения рабочих органов. Основным конструктивным параметром устройства является длина рабочего органа  $L_0$ , определяющая глубину проникновения в материал и зону его активного разрушения (Кожевников, 2018: 37–44). Остаток материала в бункере после завершения разгрузки является важным качественным критерием эффективности устройства и позволяет объективно оценить полноту обрушения.

Экспериментальные исследования проводились на модели стационарного бункера с использованием нескольких типов трудносыпучих материалов различной плотности и влажности. Для определения оптимального расположения рабочих органов в стенках выпускной воронки лабораторного бункера (Рис. 3, а, б) были изготовлены технологические отверстия с координатами (0 м; 0,47 м). Такое расположение обеспечивает максимальное разведение рабочих органов от оси вращения, что увеличивает объём материала, вовлекаемого в разрушение свода (Кожевников, 2009: 43–49).

Анализ геометрических параметров показал, что на разрезе А–А (Рис. 3) зона действия рабочих органов при координате  $y_0$  имеет форму полукруга радиусом  $L_0$  и превосходит по площади зону, полученную при другой координате  $y$ . Уменьшение зоны действия при изменении координаты объясняется наличием препятствия со стороны вертикальной стенки бункера, ограничивающей расхождение рабочих органов (Перевертов, 2020б: 158–170). Горизонтальная проекция области воздействия представляет собой окружность, вписанную в трапецию формы стенки, и имеет максимальную площадь при координатах (0 м; 0,47 м), что подтверждает корректность выбранных параметров.

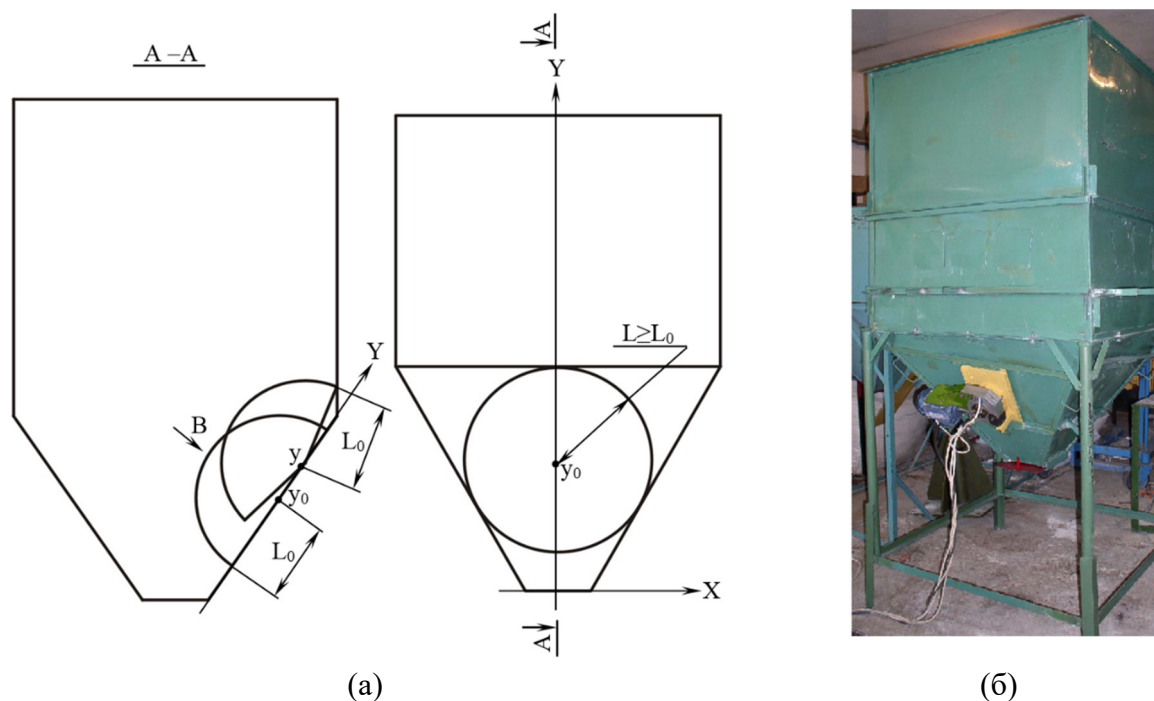


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования истечения груза из бункера: схема координат расположения технологических отверстий в стенках выпускной воронки (а); лабораторный образец бункера (б) (Кожевников, 2023: 52)

Основной задачей экспериментов являлось установление зависимости массы выгруженного груза от длины рабочего органа  $L_0$ , количества технологических отверстий и последовательности их использования. В ходе испытаний длина рабочих органов изменялась в диапазоне 0,065–0,26 м. Согласно результатам, приведённым на рисунках 4–6, максимальное количество выгруженного материала достигается при  $L_0 = 0,26$  м. Этот результат согласуется с данными теоретических расчётов и ранее опубликованных работ (Третьяков, 2003: 1).

Эксперименты проводились в двух схемах использования отверстий:

Схема I – II – III. Первые два отверстия расположены смежно. При этой конфигурации наблюдалась частичная выгрузка, так как разрушение сводов происходило неравномерно, и оставались застойные зоны (Рис. 4).

Схема I – III – II. Первые два отверстия расположены противоположно. Эта схема показала полное опорожнение бункера (Рис. 5). На втором этапе (использование отверстия № III) наблюдалось равномерное разрушение сводов и отсутствие остатка материала, что подтверждает эффективность симметричного расположения отверстий.

Результаты количественного анализа (Рис. 6) показали, что степень разгрузки  $M$  увеличивается пропорционально росту длины рабочих органов  $L_0$ . Наибольший эффект достигается при  $L_0 = 0,26$  м, что соответствует оптимальному сочетанию глубины проникновения и крутящего момента. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании новых переносных сводообрушителей и при модернизации существующих конструкций.

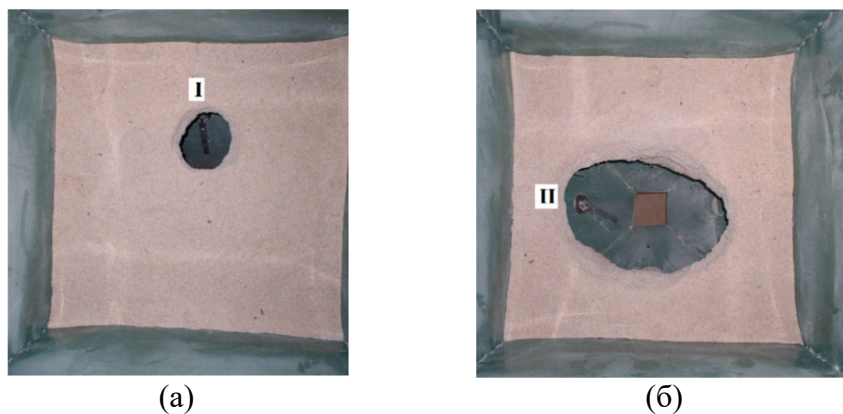


Рис. 4. Результаты разгрузки бункера по схеме I – II – III: результат использования первого по очереди технологического отверстия №I (а); результат использования второго по очереди технологического отверстия №II (б) (Кожевников, 2023: 53)

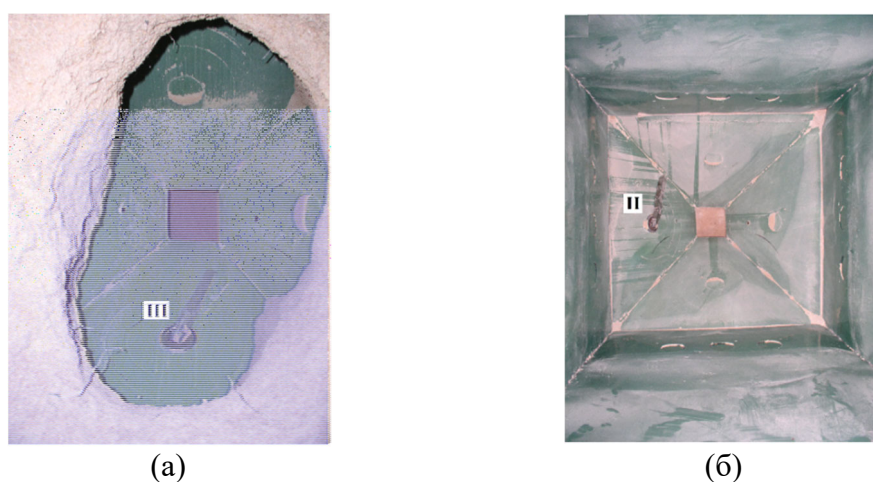


Рис. 5. Результаты разгрузки бункера по схеме I – III – II: результат использования второго по очереди технологического отверстия №III – неполное опорожнение бункера (а); результат использования третьего технологического отверстия №II – полное опорожнение (б) (Кожевников, 2023: 53)

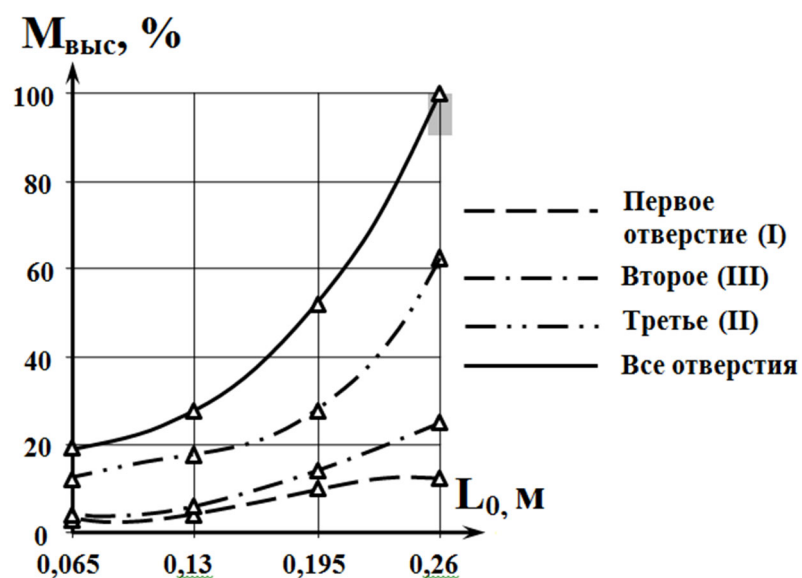


Рис. 6. График зависимости степени разгрузки отрубей М, % от размера рабочих органов L<sub>0</sub>, м на каждом этапе последовательного использования технологических отверстий (каждого в отдельности и всех вместе) (Кожевников, 2023: 54)

Сопоставление данных настоящего исследования с результатами предыдущих работ (Перевертов, 2020а: 145–149) подтверждает, что предложенные конструктивные решения обеспечивают повышение производительности разгрузки на 15–20 % и снижение времени полного опорожнения бункера. Таким образом, разработанная методика позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики переносного сводообрушителя, но и расширить область его применения в промышленных условиях.

#### **Заключение.**

Проведённое исследование позволило комплексно оценить конструктивные и эксплуатационные особенности мобильного сводообрушителя, предназначенного для работы с трудносыпучими материалами. Цели и задачи, поставленные в рамках исследования, реализованы последовательно: от теоретического анализа существующих систем выгрузки до практической апробации разработанного устройства на действующих бункерных установках. Используемые методы теоретического моделирования, экспериментального анализа и параметрической оптимизации подтвердили выдвинутую гипотезу о том, что применение мобильных устройств с адаптируемыми рабочими органами позволяет существенно повысить эффективность разгрузки и снизить вероятность образования сводов.

Полученные результаты демонстрируют, что использование переносных сводообрушителей нового поколения обеспечивает полную выгрузку емкости и одновременную очистку стенок бункера от налипших отложений и зависаний. Наиболее рациональная конструктивная схема устройства включает жёсткие рабочие органы скребкового типа, выполненные из композитных материалов, сочетающих лёгкость и высокую износостойкость. Это решение позволило уменьшить массу оборудования и повысить его энергоэффективность.

Практическая значимость исследования заключается в разработке технологии функционирования мобильного сводообрушителя, учитывающей геометрию бункера, физико-механические свойства груза и режимы работы оборудования. Внедрение разработанных рекомендаций способствует сокращению простоев, увеличению производительности и повышению надёжности транспортно-технологических систем.

Научная новизна работы состоит в системном подходе к оптимизации взаимодействия рабочих органов устройства с материалом, а также в использовании алгоритмов принятия решений, заимствованных из «умных производственных систем». Это позволило сформировать новую методику расчёта конструктивно-режимных параметров, обеспечивающую адаптацию устройства к различным видам сыпучих материалов.

Подтверждение истинности выдвинутого тезиса получено в результате экспериментальной проверки: измеренные параметры разгрузки и усилий взаимодействия подтвердили эффективность выбранных решений и достоверность теоретических моделей. Таким образом, результаты работы вносят вклад в развитие научных представлений о процессах разрушения сводов и разгрузки трудносыпучих материалов, расширяя границы существующих инженерных знаний.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой интеллектуальных систем автоматического управления процессами разгрузки, основанных на гибких технологиях и методах машинного обучения. Это позволит повысить степень автономности работы устройств, минимизировать человеческий фактор и адаптировать оборудование под условия конкретных производственных объектов.

Практическое применение результатов исследования возможно на предприятиях горнодобывающей, строительной и пищевой промышленности, где необходима разгрузка бункеров с вязкими или слёживающимися материалами. Предложенные решения могут быть внедрены как в новые технологические линии, так и при модернизации

существующего оборудования, обеспечивая повышение эффективности и устойчивости производственных процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

Астраханский, 2017 — Астраханский А.Ю., Кожевников В.А., Киреев В.П. Рекомендации по оптимизации конструктивно-режимных параметров переносных сводообрушителей-очистителей при их проектировании // Современные проблемы теории машин: Материалы международной научно-практической конференции. — Новокузнецк: НИЦ МС. — №5. — С. 37–41. [Russ.]

Варламов, 1999 — Варламов А.В. Повышение эффективности процесса выпуска компонентов комбикорма бункерным устройством с донным щелевым отверстием и механическим сводообрушителем. Дисс. канд. техн. наук. — Саратов. — 1999. — 113 с. [Russ.]

Горюшинский, 2007 — Горюшинский В.С., Кожевников В.А., Губарев М.А. Расширение функциональных возможностей существующего парка бункеров и кузовов транспортных средств насыпных // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — Самара: СамНЦ РАН. — Т. 9. — №3 — С. 796–800. [Russ.]

Денисов, 2001 — Денисов В.В., Кожевников В.А. Устройства для выпуска трудносыпучих материалов из силосов // Комбикорма. — 2001. — №5. — С. 17. [Russ.]

Жданов, 2019 — Жданов А.Г., Кожевников В.А., Перевертов В.П., Свечников А.А. Эксплуатация наземных транспортно-технологических средств: учебник в двух частях. Ч. 1: Надежность. — Самара: СамГУПС. — 2019. — Ч. 1. — 214 с. [Russ.]

Жданов, 2018 — Жданов А.Г., Перевертов В.П., Кожевников В.А., Свечников А.А. Патент №184049 (ПМ) «Сводоразрушитель-очиститель» // Банк патентов. — 2018. — №2. — С.1. [Russ.]

Кожевников, 2018 — Кожевников В.А., Денисов В.В., Прусов М.В. Теоретические исследования процесса устранения зависаний в бункерах для хранения и транспортировки сыпучих грузов // Вестник транспорта Поволжья. — Самара: СамГУПС. — 2028. — №1. — С. 37–44. [Russ.]

Кожевников, 2009 — Кожевников В.А., Горюшинский В.С., Минько Р.Н. Анализ существующих технологий разгрузки трудносыпучих грузов из бункеров и кузовов транспортных средств // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. — Самара: СамГУПС. — 2009. — №1. — С. 43–49. [Russ.]

Перевертов, 2020а — Перевертов В.П. Материаловедение и гибкие технологии: учебник. — Самара: СамГУПС. — 2020. — 280 с. [Russ.]

Перевертов, 2020б — Перевертов В.П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах: монография. — Самара: СамГУПС. — 2020. — 291 с. [Russ.]

Перевертов, 2020в — Перевертов В.П., Абулкасимов М.М., Акаева М.М. Алгоритм принятия решений при формообразовании деталей в «умных производственных системах» // Промышленный транспорт Казахстана. — 2020. — №1(66). — С. 54–63. [Russ.]

Третьяков, 2003 — Третьяков Г.М., Горюшинский В.С., Горюшинский И.В., Шур В.Л., Кожевников В.А. Патент 2201813 С1 RU МКИ В08G9/08, В65D88/68. «Переносной сводообрушитель-очиститель». — Опул. 10.04.2003, Бюл. №10. — 2003. — С.1.[Russ.]

Золкин, 2021 — Золкин А.Л., Галянский С.А., Кузьмин А.М. Perspectives for use of composite and polymer materials in aircraft construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd. — 2021. — P. 12023. [Eng.]

#### REFERENCES

Astrakhanskii, 2017 – Astrakhanskii A.Yu., Kozhevnikov V.A., Kireev V.P. (2017). Rekomendatsii po optimizatsii konstruktivno-rezhimnykh parametrov perenosnykh svodoobrushitelei-ochistitelei pri ikh proektirovanii [Recommendations for optimizing design and operational parameters of portable vault collapsers-cleaners during their design] // Sovremennye problemy teorii mashin: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. — Novokuznetsk: NITs MS. — 2017. — №5. — Pp. 37–41. [in Russ.]

Varlamov, 1999 – Varlamov A.V. (1999). Povyshenie effektivnosti protsessa vypuska komponentov kombikorma bunkerным ustroystvom s donnym shchelevym otverstiem i mekhanicheskim svodoobrushitelem [Improving the efficiency of compound feed component release using a bunker device with a bottom slit and mechanical vault collapsers]. Diss. kand. tekhn. nauk. — Saratov. — 1999. — 113 p. [in Russ.]

Goryushinskii, 2007 – Goryushinskii V.S., Kozhevnikov V.A., Gubarev M.A. (2007). Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostei sushchestvuyushchego parka bunkerov i kuzovov transportnykh sredstv nasypnykh [Expanding the functional capabilities of the existing fleet of bulk material bunkers and vehicle bodies] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. — Samara. — 2007. — Vol. 9(3). — Pp. 796–800. [in Russ.]

Denisov, 2001 – Denisov V.V., Kozhevnikov V.A. (2001). Ustroystva dlya vypuska trudnosypuchikh materialov iz silosov [Devices for releasing difficult-to-flow materials from silos] // Kombikorma. — 2001. — №5. — P. 17. [in Russ.]



Zhdanov, 2019 – Zhdanov A.G., Kozhevnikov V.A., Perevertov V.P., Svechnikov A.A. (2019). Eksploatatsiya nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv: uchebnik v dvukh chastyakh. Ch. 1: Nadezhnost' [Operation of ground transport-technological means: textbook in two parts. Part 1: Reliability]. — Samara: SamGUPS.— 2019. — 214 p. [in Russ.]

Zhdanov, 2018 – Zhdanov A.G., Perevertov V.P., Kozhevnikov V.A., Svechnikov A.A. (2018). Patent №184049 (PM) “Svodo-razrushitel-ochistitel” [Patent №184049 (PM) “Vault destroyer-cleaner”] // Bank patentov, (2). — 1 p. [in Russ.]

Kozhevnikov, 2018 – Kozhevnikov V.A., Denisov V.V., Prusov M.V. (2018). Teoreticheskie issledovaniya protsessa ustraneniya zavisanii v bunkerah dlya khraneniya i transportirovki sypuchikh gruzov [Theoretical studies of the process of eliminating hang-ups in bins for storage and transportation of bulk cargo] // Vestnik transporta Povolzh'ya.— Samara: SamGUPS. — 2018. — №1.— Pp. 37–44. [in Russ.]

Kozhevnikov, 2009 – Kozhevnikov V.A., Goryushinskii V.S., Min'ko R.N. (2009). Analiz sushchestvuyushchikh tekhnologii razgruzki trudnosypuchikh gruzov iz bunkerov i kuzovov transportnykh sredstv [Analysis of existing unloading technologies for difficult-to-flow cargo from bins and vehicle bodies] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya,— Samara: SamGUPS. — 2009. — №1.— Pp. 43–49. [in Russ.]

Perevertov, 2020a – Perevertov V.P. (2020). Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik [Materials science and flexible technologies: textbook]. — Samara: SamGUPS.— 2020. — 280 p. [in Russ.]

Perevertov, 2020b – Perevertov V.P. (2020). Diagnostika i upravlenie kuznechnymi mashinami v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh: monografiya [Diagnostics and control of forging machines in flexible manufacturing systems: monograph]. — Samara: SamGUPS. — 2020. — 291 p. [in Russ.]

Perevertov, 2020 – Perevertov V.P., Abulkasimov M.M., Akaeva M.M. (2020). Algoritm prinyatiya reshenii pri formoobrazovanii detaley v “umnykh proizvodstvennykh sistemakh” [Decision-making algorithm in forming parts in “smart manufacturing systems”] // Promyshlenniy transport Kazakhstana. — 2020.— №1(66). — Pp. 54–63. [in Russ.]

Tret'yakov, 2003 – Tret'yakov G.M., Goryushinskii V.S., Goryushinskii I.V., Shur V.L., Kozhevnikov V.A. (2003). Patent 2201813 C1 RU MKI B08G9/08, B65D88/68. “Perenosnoi svodoobrushitel-ochistitel” [Portable vault collapsers-cleaner]. — Opubl. 10.04.2003, Byul.— 2003. — №10. — 1 p. [in Russ.]

Zolkin, 2021 – Zolkin A.L., Galyanskiy S.A., Kuz'min A.M. (2021). Perspectives for use of composite and polymer materials in aircraft construction. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd.— 2021. — P. 12023. [in Eng.]