

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РАЗРУШИТЕЛЯ СВОДОВ ПРИ РАЗГРУЗКЕ БУНКЕРОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

*Кожевников В.А., Жданов А.Г., Астраханский А.Ю.*  
*Самарский государственный университет путей сообщения, Самара*

**Ключевые слова:** сводообразование, трудносыпучий материал, стационарный бункер, сводообрушение, технологические отверстия, мобильный разрушитель сводов, рабочие органы, исследование выпуска материала.  
**Аннотация.** В публикации излагается методика экспериментальных исследований процесса выпуска трудносыпучих материалов с применением мобильного разрушителя сводов имеющего рабочие органы скребкового типа. Проанализированы возможные условия проведения лабораторных исследований и выбрана их последовательность, базирующаяся в целом на изучении влияния отдельно взятых изменяемых факторов на главные показатели работы устройства с учетом свойств хранимых в емкости материалов и характере их взаимодействия с рабочими органами. В качестве основного лабораторного оборудования было предложено переносное устройство разрушения сводов и стационарная бункерная установка. Определение рационального места технологических отверстий в стенках для ввода рабочих органов, их длины и величины подачи, обеспечивающих в совокупности наиболее полную разгрузку бункера, является основной задачей проводимых исследований.

## METHODOLOGY FOR DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF USING A MOBILE VAULT DESTROYER WHEN UNLOADING BUNKERS IN LABORATORY CONDITIONS

*Kozhevnikov V.A., Zhdanov A.G., Astrakhan A.Yu.*  
*Samara State University of Railway Transport, Samara*

**Keywords:** vaulting, hard-to-loose material, stationary bunker, vaulting, technological openings, mobile vault destroyer, working bodies, material release study.

**Abstract.** The publication describes the methodology of experimental studies of the process of releasing hard-to-loose materials using a mobile vault destroyer with scraper-type working bodies. The possible conditions of laboratory research are analyzed and their sequence is chosen, based on the study of the influence of individual variable factors on the main performance indicators of the device, taking into account the properties of materials stored in the container and the nature of their interaction with working bodies. A portable vault destruction device and a stationary bunker installation were proposed as the main laboratory equipment. Determination of the rational location of technological openings in the walls for the input of working bodies, their length and feed size, which together ensure the most complete unloading of the hopper, is the main task of the research.

### Ведение

Выпуск трудносыпучих материалов через отверстия бункеров часто сопровождается одновременным течением процессов сводообразования и сводообрушения (динамические своды) и достигает устойчивого характера только в случае преобладания последнего над первым [1]. В противном случае при преобладании статического характера сводообразования процесс истечения замедляется или останавливается. С целью предотвращения появления пауз в техпроцессах предприятий могут потребоваться дополнительные стимулирующие механизмы по разрушению сводов, завесаний и отложений.

Экспериментальные исследования функционирования мобильного разрушителя сводов в лабораторных условиях необходимы для проверки основных теоретических положений, определения некоторых величин, входящих в формулы, и выявления характера взаимодействия хранимых в бункерах материалов с рабочими органами [2, 3].

## Материалы и методы исследования

Методика проведения опытов основывается на изучении влияния отдельно взятых изменяемых факторов на показатели работы устройства при постоянстве всех прочих факторов. Основными факторами, влияющими на такие важные оценочные показатели работы разрушителя и емкости в целом, как изменение пропускной способности и энергозатраты выпуска груза, выступают: местоположение технологических отверстий в стенках емкости, и конструктивно-режимные параметры разрушителя.

Этапы проведения исследований объединены следующей общей последовательностью: 1) разработка и усовершенствование лабораторных образцов разрушителя сводов; 2) подготовка лабораторных образцов бункерных емкостей; 3) поиск координат технологических отверстий и конструктивных параметров рабочих органов, обеспечивающих полноту выгрузки груза из емкости; 4) установление величины пропускной способности выпускного отверстия емкости с оптимизацией параметров использования мобильных разрушителей сводов; 5) формирование на основе результатов исследований данных для расчетов и проектирования устройств.

Оптимизация количества и повторяемости экспериментов производилась по общепринятым методикам [4, 5]. Метод наименьших квадратов принят для аналитического выражения экспериментальных зависимостей, а в качестве среднеарифметического значения  $X_{cp}$  бралось наиболее вероятное из каждой последовательности  $x_n$  значений измеряемых величин; наибольшая ошибка средней арифметической измерений  $\Delta(X_{cp})$  оценивалась среднеквадратичным отклонением случайной величины  $\sigma$ , соответственно:

$$X_{cp} = \sum X_i / n; \quad \sigma = \sqrt{\sum (X_i - X_{cp})^2 / (n-1)}. \quad (1)$$

Для определения окончательного результата измерений, относительной ошибки результатов и условия исключения ошибочных результатов опытов при обработке с использованием «*t*-критерия» при уровне значимости 5% и 4-х степенях свободы, соответственно

$$X = X_{cp} \pm \Delta(X_{cp}); \quad \Delta = 100\% \cdot \Delta(X_{cp}) / X_{cp}; \quad \sqrt{X_i - X_{cp}} / \sigma \geq t. \quad (2)$$

При проведении экспериментов использовались следующие приборы и оборудование: счетчик однофазный, весы технические, весы лабораторные квадратурные, электрошкаф сушильный, ситовый классификатор, масштабная линейка, секундомер. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований осуществлялась посредством статических методов с применением ЭВМ.

Изучение конструктивно-технологических параметров мобильных разрушителей, при которых достигается эффективная выгрузка бункерных емкостей, предлагается производить с помощью лабораторных устройств (рис. 1), оснащенных рабочими скребками с зазубренной кромкой [6].

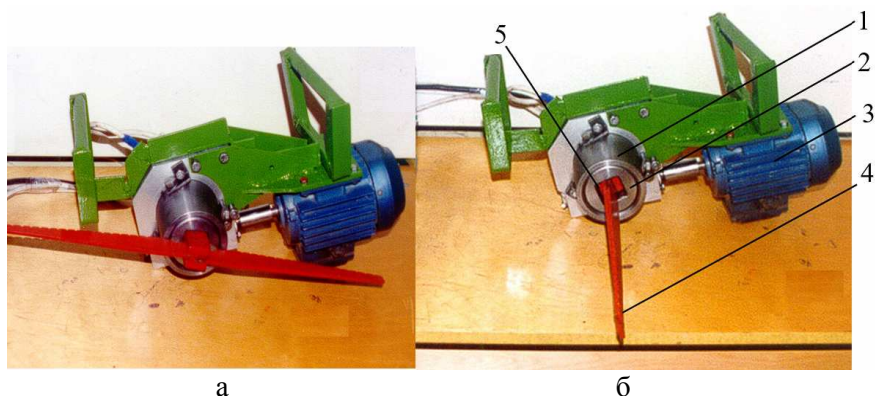


Рис. 1. Лабораторный образец мобильного разрушителя сводов с рабочими скребковыми органами:  
а – рабочие органы разведены; б – рабочие органы сведены;  
1 – гильза; 2 – полый вал; 3 – привод; 4 – рабочие органы; 5 – выдвижная вилка (резьбовая пара)

Измерение и фиксирование значений исследуемых параметров осуществлялось в процессе выпуска трудносыпучих материалов из лабораторных образцов бункерных емкостей (рис. 2), изготовленных в масштабе 1:4 по образцу одного из предназначенных для хранения компонентов кормов на «Поволжском комбикормовом заводе» (рис. 2) [7].

Короб бункера 1, опирающийся на опорные стойки 4, оснащен прикрепляемой снизу выпускной воронкой 5. Выпускное отверстие 6 оборудовано задвижкой 7. В стенках бункера и выпускной воронки выполнено несколько технологических отверстий 8, в которых фиксировался патрон устройства при помощи специальных приспособлений.

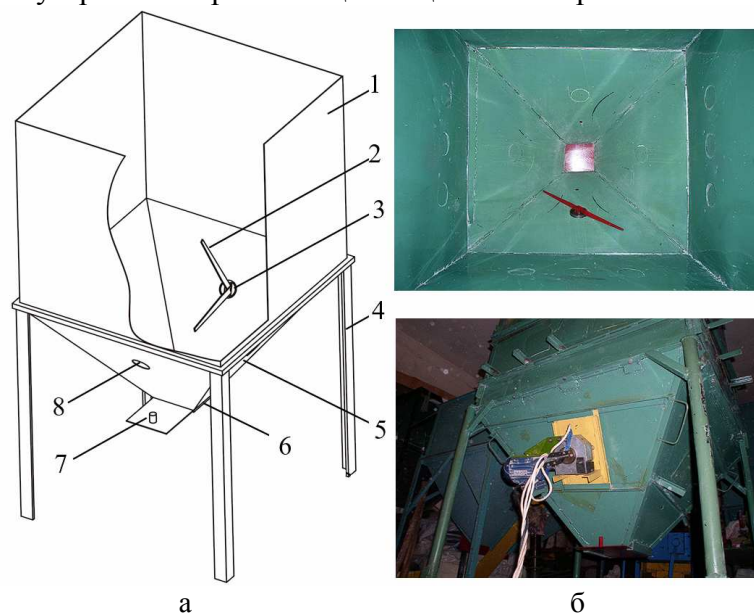


Рис. 2. Лабораторный образец бункерной емкости: а – общее устройство; б – внутренняя полость с рабочими органами и внешнее расположение устройства; 1 – съемный короб; 2 – рабочие органы; 3 – гильза; 4 – стойки; 5 – выпускная воронка; 6 – выпускное отверстие; 7 – заслонка; 8 – технологические отверстия

Согласно предшествующим исследованиям [8-10] было выявлено, что для изучения параметров и основных закономерностей функционирования разрушителей сводов в лабораторные образцы бункерных емкостей достаточно засыпать груз высотой 1 м при площади их поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>. Выбор рациональных значений режимных параметров работы мобильных устройств основывается преимущественно на выявлении зависимостей времени истечения материала от длины рабочих органов и места их введения в полость бункерной емкости.

Пропускная способность  $Q$  определялась из выражения

$$Q = M/T, \text{ кг/с}, \quad (3)$$

где  $M$  – масса выгруженного груза, кг;  $T$  – измеренное время выпуска, с.

Энергозатраты на выпуск материала при помощи мобильных устройств определялись разностью энергозатрат на рабочий (рыхление)  $W^{раб}$  и холостой (отсутствие груза в емкости) ход  $W^{хол}$

$$W = W^{раб} - W^{хол}, \text{ Дж}. \quad (4)$$

Удельная энергоёмкость процесса выпуска  $W_{уд}$  определялась из выражения

$$W_{уд} = W/M, \text{ Дж/кг}. \quad (5)$$

Для поиска оптимального расположения рабочих органов обеспечивающего наибольшее количество выгруженного материала в стенках выпускной воронки лабораторного образца бункера координаты технологических отверстий были приняты одинаковыми (0 м; 0,47 м), что соответствует точке  $y_0$  расположенной на расстоянии 0,47 м от выпускного отверстия (рис. 3,а). Такое расположение призвано добиться наибольшей

величины отклонения рабочих органов от оси вращения пологого вала, а, следовательно, наибольшей зоны контакта с хранимым материалом. Это объясняется по большей степени конструктивными особенностями емкости. Как показывает боковой разрез емкости (рис. 3,а) площадь проекции зоны действия рабочих органов (полуокружность радиусом  $L_0$ ) при использовании технологического отверстия с координатой  $y_0$  превосходит площадь зоны образованной при использовании координаты  $y$ , представляющей собой круговой сектор с таким же радиусом. Ограничение величины вертикальной координаты точкой  $y$  объясняется созданием вертикальной стенкой емкости препятствия для максимального разведения рабочих органов. Однако горизонтальная на стенку выпускной воронки бункера проекция зоны действия рабочих органов имеет максимально возможную для выбранных значений координат площадь, обеспечивающую полную очистку стенки. Площадь очищаемой поверхности является вписанной в трапецию окружностью, позволяющей достигать рабочим органам длины  $L_0=0,36$  м. Превышение данного размера ( $L>L_0$ ) будет препятствовать очистке.

Используя одно из отверстий, обеспечивается выгрузка из зоны (I) бункера. С помощью оставшихся в других стенках отверстий разгружаются зоны (II) и (III) (рис 3,б).

Важным условием использования мобильных разрушителей сводов является неизменность размеров рабочих органов при различном их положении в емкости, что требует минимума их эксплуатируемого количества при минимальном времени на выполнение технологической операции (отсутствует необходимость замены). Для поиска оптимальных значений было изготовлено несколько пар сменных рабочих органов в диапазоне варьирования их длины 0,26...0,46 м (шаг 0,05 м).

### Результаты

Влияние величины объема пространства емкости, охватываемого рабочими органами на энергозатратность процесса выпуска, подтверждается полученными экспериментальными зависимостями, сопоставление которых указывает на достижение минимума при длине рабочих органов, дающей минимальный охват пространства бункера (рис. 4). Оптимальная длина рабочих органов, соответствующая полной разгрузке при минимуме энергозатрат, составляет для мясокостной муки, отрубей и мела  $L_0=0,36$  м (выделено серой зоной).

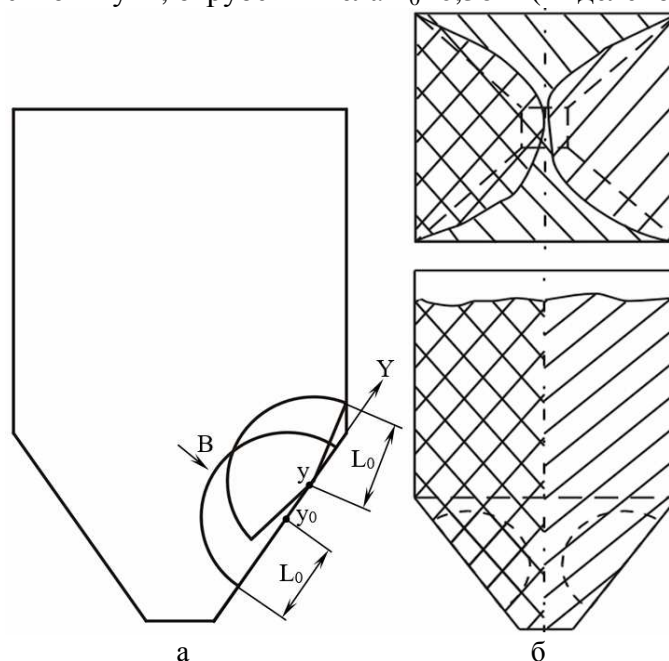


Рис. 3. Схема к определению координат технологических отверстий: а – зона охвата рабочими органами; б – зоны выгружаемого груза; штриховка перекрестная (зона I); штриховка правая (зона II); штриховка левая (зона III)

Перед проведением опыта бункерная емкость полностью заполнялись компонентами комбикормов с последующим его уплотнением: на 10% для отрубей, на 21% для мясокостной

муки и на 27% для мела (общее количество загружаемого в емкости материала составило соответственно 450 кг, 240 кг и 540 кг); затем полным открытием выпускного отверстия достигался свободный выход материала находящегося ниже линии свода; после чего поочередным введением рабочих органов в технологические отверстия различных зон емкости, производилось разрушение свода. Каждая порция высыпаемого материала на определенном технологическом этапе взвешивалась.

Угол между двумя рабочими органами с каждым оборотом приводного вала увеличивался до 180°. Чтобы изменить значение угла отклонения  $\alpha$  (подачу) и вместе с тем число отклонений рабочего органа и оборотов приводного вала, за которые осуществляется разрушение свода и тем самым повлиять на энергоемкость процесса, нужно прибегнуть к изменению шага резьбы винтовой пары привода.

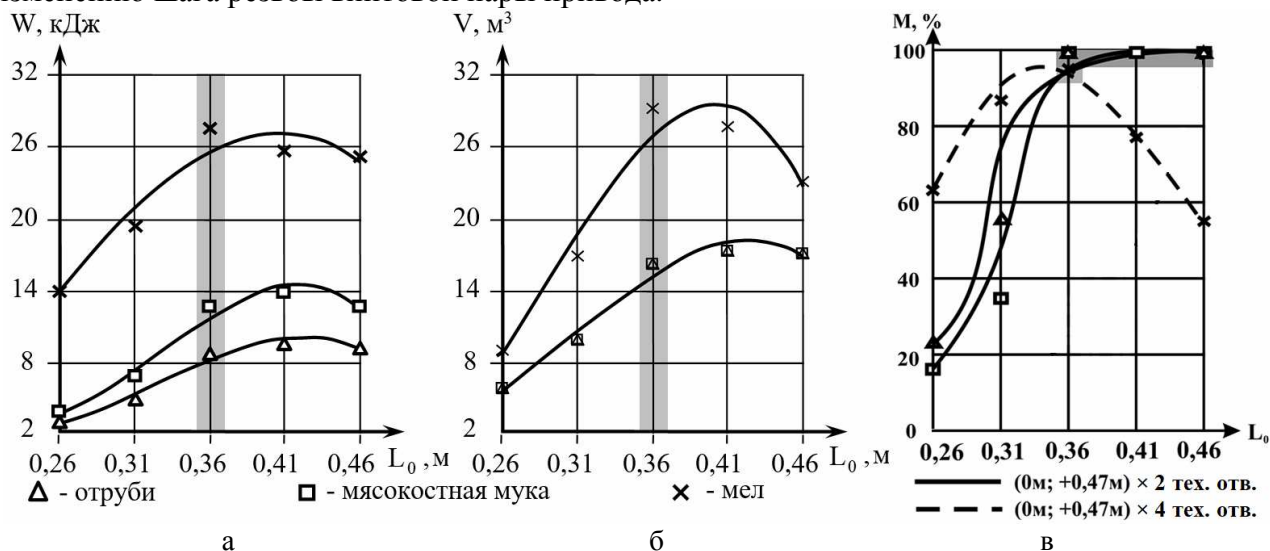


Рис. 4. Экспериментальная оценка влияния длины рабочих органов на эффективность разгрузки бункера: а – энергозатраты ( $W$ ); б – объем взаимодействия с материалом ( $V$ ); полнота разгрузки ( $M$ ) при рациональном числе (2 и 4) технологических отверстий

Угловая подача при одном обороте составит

$$\alpha = 90t_{рез} / Nh, \tag{6}$$

где  $N$  и  $h$  – соответственно количество оборотов и ход винта, необходимые для отклонения каждого рабочего органа на угол 90°;  $t_{рез}$  – шаг резьбы винта и гайки.

Для исследований влияния подачи на величину энергозатрат полного выпуска материала из бункера было изготовлено несколько сменных кинематических пар «винт-гайка» с различными значениями шагов резьбы и соответствующими углами отклонения рабочих органов (табл. 1).

Табл. 1. Кинематические характеристики рабочих органов

Параметр	Значение		
Шаг резьбы $t_{рез}$ , мм	1	1,75	2,5
Угол отклонения рабочего органа $\alpha$ , °	2,093	3,663	5,233
Количество оборотов, $N$	43	24	17,2

### Заключение

Экспериментальные исследования показали, что энергоемкость процесса разрушения сводов и полнота выгрузки слежавшихся материалов из стационарного бункера зависят от увеличения объема пространства, охватываемого рабочими органами мобильного разрушителя сводов, который в свою очередь определяется их размерами, а также количеством и местоположением технологических отверстий.



### Список литературы

1. Кунаков В.С. Федосеев В.Б. Статический анализ периодичности образования сводов в бункерах // Информационное обеспечение и управление в мехатронных производственных системах: Межвузовский сборник научных статей. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1998. – С. 67-68.
2. 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. – 2018. – №1. – С. 37-44.
3. Кожевников В.А., Жданов А.Г., Астраханский А.Ю. Теоретические исследования процесса рыхления слежавшихся грузов переносным сводообрушителем // Современные проблемы теории машин. – 2017. – №5. – С. 28–32.
4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
5. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. – М.: Наука, 1971. – 71 с.
6. Патент №2200121 РФ. Устройство для разрушения сводов слежавшегося материала / Г.М. Третьяков, В.С. Горюшинский, И.В. Горюшинский, В.В. Денисов. – Заявка №2001124726/13 от 10.09.2001; опубликовано 10.03.2003, Бюл. №7.
7. Денисов В.В., Кожевников В.А. Устройства для выпуска трудносыпучих материалов из силосов // Комбикорма. – 2001. – № 5. – С. 17.
8. Варламов А.В. Повышение эффективности процесса выпуска компонентов комбикорма бункерным устройством с донным щелевым отверстием и механическим сводообрушителем: Дисс. ... канд. техн. наук. – Саратов: Саратовский ГАУ, 1999. – 113 с.
9. Горюшинский И.В. Совершенствование рабочего процесса и обоснование параметров бункерного устройства с побудителем скребкового типа для выпуска комбикорма и его компонентов: Дисс. ... канд. техн. наук. – Саратов: Саратовский ГАУ, 1997. – 121 с.
10. Денисов В.В. Совершенствование складирования и выпуска из бункеров сводообразующих компонентов комбикорма: Дисс. ... канд. техн. наук. – Саратов: Саратовский ГАУ, 2001. – 154 с.

### References

1. Kunakov V.S. Fedoseev V.B. Static analysis of the periodicity of the formation of vaults in bunkers // Information support and management in mechatronic production systems: Intercollegiate collection of scientific articles – Rostov-on-Don: DSTU, 1998. – P. 67-68.
2. Kozhevnikov V.A., Denisov V.V., Prusov M.V. Theoretical studies of the process of eliminating freezes in bunkers for storage and transportation of bulk cargo // Bulletin of Transport of the Volga region. 2018, no. 1, pp. 37-44.
3. Kozhevnikov V.A., Zhdanov A.G., Astrakhansky A.Yu. Theoretical studies of the process of loosening of packed loads with a portable arch breaker // Modern problems of machine theory. 2017, no. 5, pp. 28–32.
4. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. Experiment planning in the search for optimal conditions. – M.: Science, 1976. – 280 p.
5. Rumshinsky L.Z. Mathematical processing of experimental results. – M.: Science, 1971. – 71 p.
6. Patent No. 2200121 RU. Device for the destruction of the arches of the caked material / G.M. Tretyakov, V.S. Goryushinsky, I.V. Goryushinsky, V.V. Denisov. – Appl. No. 2001124726/13 from 10.09.2001; publ. 10.03.2003, Bul. No. 7.
7. Denisov V.V., Kozhevnikov V.A. Devices for the release of hard-to-loose materials from silos // Compound feed. 2001, no. 5, p. 17.
8. Varlamov A.V. Improving the efficiency of the process of releasing feed components by a hopper device with a bottom slit hole and a mechanical arch breaker: Diss. ... cand. of tech. sc. – Saratov: SSAU, 1999. – 113 p.
9. Goryushinsky I.V. Improvement of the workflow and justification of the parameters of a hopper device with a scraper-type stimulator for the production of compound feed and its components: Diss. ... cand. of tech. sc. – Saratov: SSAU, 1997. – 121 p.
10. Denisov V.V. Improvement of storage and release of compound feed components from bunkers: Diss. ... cand. of tech. sc. – Saratov: SSAU, 2001. – 154 p.

#### Сведения об авторах:

#### Information about authors:

<b>Кожевников Вадим Александрович</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Kozhevnikov Vadim Aleksandrovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor
<b>Жданов Андрей Геннадьевич</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Zhdanov Andrey Gennadievich</b> – candidate of technical sciences, associate professor
<b>Астраханский Алексей Юрьевич</b> – старший преподаватель	<b>Alexey Yurievich Astrakhan</b> – senior lecturer
v_a_kozhevnikov@bk.ru	

Получена 12.11.2023