

Р. Н. Минько

Проблема сводообразования в емкостях бункерного типа в условиях длительного хранения

В статье показана сущность процесса сводообразования, представлены его последствия. Рассматривается специфика существующих технологий стимулирования разгрузки слежавшегося груза. Особое внимание уделено выявлению факторов, которые приводят к нарушению производственного цикла вследствие изменений, происходящих с материалом в результате внешнего воздействия. Автор представляет универсальную конструкцию, позволяющую стимулировать эффективность процесса разгрузки и очистки емкостей хранения сыпучего материала.

Ключевые слова: сводообразование, бункерное устройство, теория критериев пластичности и прочности, сводообрушающее оборудование, эффективный процесс разгрузки и очистки емкостей, механизм движения сыпучих материалов.

R. N. Minko

Bridging Problem in Bunker Type Capacities in Conditions of Long Storage

In the article the essence of the process of bridging is presented, its consequences are reflected. Specificity of existing technologies of stimulation of unloading of packed freight is presented. The special attention is paid to understanding of factors bringing to deviation in a production cycle owing to changes occurring to a material under the influence of external factors.

Keywords: bridging, a bunker device, the theory of plasticity and strength criteria, cave vault equipment, an efficient process of unloading and cleaning of tanks, the mechanism of movement of bulk materials.

Задачи, связанные с погрузочно-разгрузочными операциями, обеспечивающими сокращение ручного труда и увеличение коэффициента загрузки транспорта, требуют особого внимания. При использовании в технологическом процессе бункеров и транспортных средств с кузовами бункерной конструкции наблюдается явление сводообразования, в результате которого значительно увеличивается время полной очистки емкостей хранения и транспортировки насыпных грузов. Это приводит к нарушениям требований безопасности при выполнении работ и достаточно большим финансовым потерям. Очевидно, что актуальность решения данной проблемы связана не только с задачей повышения уровня технической и технологической надежности бункерных устройств, но и с обеспечением требований охраны и гигиены труда и с экономическим фактором.

Напрашивается вывод, что с целью стимулирования динамики разгрузки отпускных бункеров и кузовов транспортных средств, снижения потерь грузов на промышленных предприятиях и повышения качества очистки емкостей для хранения грузов необходимо разработать универсальную конструкцию, позволяющую осуществлять более эффективный процесс разгрузки и очистки емкостей хранения сыпучего материала.

Многочисленные исследования процесса сводообразования позволили установить лишь некоторые зависимости, объясняющие суть этого процесса. Степень влияния огромного числа различных взаимосвязанных факторов на сводообразование трудно оценить практически и предсказать теоретически: это и геометрия бункера и выпускного отверстия, и физико-механические свойства материалов, и условия загрузки, хранения и выпуска. Именно в связи со сложностью процесса сводообразования до настоящего времени не удалось создать универсальное сводообрушающее устройство, эффективно работающее с любым сыпучим материалом в бункерах различной геометрии.

Обобщая опыт использования емкостей бункерного типа, В. А. Богомягих убедительно доказывает, что увеличение капитальных и эксплуатационных затрат на них не оправдывает себя, поскольку такие емкости с точки зрения их технологической и технической надежности остаются малоэффективными. В весьма немногочисленных теоретических работах, посвященных этому вопросу, рассматриваются, как правило, только силы, действующие на стенки емкостей при покое сыпучего тела.

Движение же сыпучих тел в них изучается зачастую лишь экспериментально, причем данные, полученные различными исследователями, не всегда согласуются. Такая ситуация в динамике сыпучих тел вообще и в теории движения сыпучих тел в бункерах в частности сдерживает технический прогресс в рассматриваемой области [2].

Прежде всего, обратимся к вопросу прочности конструкций механизированных и автоматизированных бункерных устройств, питателей и погрузочно-разгрузочных механизмов с учетом механических свойств сыпучих материалов.

Проблема оценки прочности элементов конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния, возникла давно и не потеряла своей актуальности до настоящего времени.

В развитии теории критериев пластичности и прочности можно выделить несколько этапов. Еще в прошлом веке возникли некоторые гипотезы о характере напряженного состояния, при котором наступает разрушение или пластическая деформация, получившие название механических теорий (или критериев) прочности и пластичности. Следующей ступенью в формировании теории явилась разработка критериев прочности для изотропных материалов, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию (бетон, чугун и др.). Прочность большинства материалов, различно сопротивляющихся растяжению и сжатию, оценивается в рамках обобщенных критериев в виде полиномиальных зависимостей Ю. А. Ягна, Шлейхера – Боткина, П. П. Баландина и др. Более общее выражение подобных критериев предложено М. М. Филоненко-Бородичем. В работах И. И. Гольденבלата и В. А. Копнова определяются основные положения теории критериев пластичности и прочности конструкционных материалов. Технологическому обеспечению качества поверхностного слоя деталей машин при различных методах механической обработки посвящены труды В. И. Аверченкова, В. Ф. Безъязычного, С. Г. Бишутина, О. А. Горленко, П. Е. Дьяченко, А. И. Исаева, В. А. Козлова, Т. Д. Кожиной, Б. А. Кравченко, А. Д. Макарова, А. А. Маталина, В. С. Мухина, Ю. К. Новоселова, Э. В. Рыжова, С. С. Силина, В. К. Старкова, А. М. Сулимы, А. Г. Суслова, В. П. Федорова, Т. В. Шаровой, Ю. Г. Шнейдера и других ученых. Анализ работ вышеперечисленных исследователей показал, что эксплуатационные свойства деталей машин в значительной мере определяются параметрами качества поверхностного слоя. Например, комплексный параметр S_x , используемый для оценки качества поверхности трения, включает в себя параметры шероховатости, волнистости, макроотклонения и физико-механические параметры поверхностного слоя [4, 7, 8, 12].

Также трудно переоценить научное и практическое значение исследований механизма движения сыпучих материалов под действием собственного веса, так как физико-механические свойства данных материалов и закономерности их истечения оказывают решающее влияние на конструкцию бункеров, а также выпускных устройств и приспособлений, стимулирующих истечение.

Изучению физико-механических свойств сыпучих материалов и закономерностей их движения и истечения посвящено немало отечественных работ, из которых наиболее значительными следует считать книги В. В. Соколовского «Статика сыпучей среды» (1954), Г. К. Клейна «Строительная механика сыпучих тел» (1956), Р. Л. Зенкова «Механика насыпных грунтов» (1964), Г. А. Гениева «Основы динамики сыпучей среды» (1958) и др.

В области исследований динамики истечения сыпучих сред из емкостей, борьбы со сводообразованием и в сфере разработки сводообрушающего оборудования отметим значительный вклад следующих ученых К. В. Алферова, А. И. Белоусова, И. И. Блехмана, В. А. Богомягких, В. С. Горюшинского, И. В. Горюшинского, Л. В. Гячева, Э. В. Дженике, Д. Н. Ешуткина, В. И. Желткова, Р. Л. Зенкова, Р. Квапила, Б. Г. Кеглина, В. С. Кунакова, О. Г. Локтионовой, О. П. Мулжиной, В. Ф. Семенова, В. В. Соколовского, Г. М. Третьякова, Л. С. Ушакова, С. Ф. Яцуна и др. В их работах рассмотрены основные характеристики и физико-механические свойства сыпучих материалов, в той или иной степени влияющих на процесс сводообразования, отражены общие направления исследований в области бесперебойного функционирования бункерных устройств и совершенствования сводообрушающего оборудования для сыпучих грузов с широким спектром физико-механических свойств.

В результате проведенного теоретического анализа установлено, что исследования процесса истечения сыпучих материалов из бункеров ведутся в четырех основных направлениях. Первое направление опирается на теорию упругости сплошной среды (Г. А. Гениев); второе направление – на общую теорию предельного равновесия сыпучего материала (Р. Л. Зенков); третье направление – на дискретную сыпучую среду (Л. В. Гячев); четвертое направление – на гипотезу сводообразования сыпучих

материалов, то есть способность сыпучего тела образовывать сводчатые структуры из дискретных частиц (В. А. Надеждин, В. А. Богомягих) [2, 6, 9].

Анализируя работы А. И. Мансимова, Р. Л. Зенкова, А. В. Гячева, В. А. Богомягих, В. Ф. Семенова, К. В. Алферова, И. И. Кочанова, можно отметить, что основными параметрами, влияющими на величину расхода сыпучих материалов из бункеров, являются: размер выпускного отверстия бункера и физико-механические свойства сыпучих материалов. В ряде аналитических зависимостей присутствуют определенные коэффициенты и константы, значения которых обусловлены видом истекающего из бункера материала и соотношениями конструктивного плана применительно к машинам с большой часовой производительностью. В связи с чем применение этих зависимостей при обосновании бункера с питателем в решетной установке со значительно меньшей производительностью не является правомерным.

Следует подчеркнуть, что на сегодняшний день нет единой теории истечения сыпучих материалов и процессов сводообразования в бункере. Например, Р. Л. Зенков, Р. Квапил и др. отмечают значительное влияние на скорость истечения сыпучего материала высоты его слоя, а Б. С. Фиалков, Ф. Е. Кенеман и др. констатируют его отсутствие. Так, при хранении щепы в бункере происходит ее уплотнение, которое в процессе длительного хранения приводит к увеличению силы сцепления между частицами, что уменьшает их подвижность и способствует росту сил сопротивления сдвигу. Как показал опыт эксплуатации бункеров, формула Янсена дает заниженные значения давлений на днище и стенки бункера. Это объясняется тем, что в формуле не учитывается изменение плотности сырья при хранении в бункере. Теория Н. Янсена предусматривает случай, когда площадью давления является все дно бункера, а боковое трение возникает между разнородными телами – сыпучим телом и материалом стенок бункера. В исследовании С. Дженки сыпучее тело представляет собой совокупность однородных абсолютно твердых плоских дисков, уложенных правильными рядами. В теории П. Шульца порода (груз) рассматривается как изгибающаяся балка. Он указывает, что если совершенно однородные слои имеют малое сцепление, то каждый слой над выработанным пространством будет изгибаться сам по себе под влиянием собственного веса, как изгибается закрепленная по концам нагруженная балка. По теории профессора М. Протодяконова нагрузка на свод принимается вертикальной и равномерно распределяется по всей его горизонтальной поверхности, в связи с чем кривая свода очерчивается по параболе. Вопрос об образовании сводов в бункерах, когда размеры частиц сыпучего тела не слишком велики в сравнении с размерами возможных сводов, освещен в работах Н. Васильева, однако в его исследованиях не учтены факторы, влияющие на процесс сводообразования.

Вопросы силы сцепления между частицами подробно исследованы профессором Р. Л. Зенковым, который, исходя из их напряженного состояния, пришел к выводу, что при определенных условиях над выпускным отверстием образуется свод, совпадающий по форме с траекториями наибольших напряжений. Недостатком теории Р. Л. Зенкова является то, что в ней не учитывается влияние вышележащих слоев сыпучего материала на выделенный над выпускным отверстием элементарный объем, а также влияние размеров частиц.

В рамках теории профессора В. А. Богомягих объясняются все явления, возникающие в емкостях при статическом и динамическом состоянии сыпучих материалов на основании эквивалентного «динамического» свода. Анализ теоретического материала показывает, что наибольшим соответствием практическим исследованиям обладает сводообразующая модель сыпучего тела. Как отмечает А. В. Варламов, теория В. А. Богомягих достаточно точно описывает процессы, протекающие в сыпучем теле при его выгрузке из бункеров, раскрывает теоретические предпосылки взаимосвязи параметров сыпучего тела с параметрами аккумулирующего его бункера, позволяет производить расчеты бункерных систем. Согласно этой теории на движение сыпучего тела, ограниченного стенками бункера, оказывает значительное влияние динамическое и статическое сводообразование. Динамические своды замедляют процесс выгрузки, а статические его прекращают [1].

В работе «Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах» И. В. Горюшинского, И. И. Кононова, В. В. Денисова, Е. В. Горюшинской, Н. В. Петрушкина дано следующее определение сводообразования: сводообразование – это образование сводов в емкостях в процессе выпуска сыпучего груза. Выделяют два основных направления для обеспечения бесперебойной выгрузки сыпучих грузов из емкостей: во-первых, предотвращение возникновения сводов, что может быть достигнуто

правильным выбором параметров емкости; во-вторых, разрушение образовавшихся сводов с применением различных сводообрушающих устройств [5].

По мнению данных ученых, оба направления актуальны, однако наиболее прогрессивно первое, так как лучше предотвратить сводообразование, чем бороться с ним. Выбор средств для разрушения образовавшихся в емкости сводов зависит от физико-механических свойств материала и параметров самой емкости.

Таким образом, изучив существующие теории, отражающие суть сводообразования, мы пришли к выводу, что подавляющая их часть описывает поведение самого материала, но не предлагает решения выявленных проблем. Кроме того, поскольку свойства материалов значительно варьируются, очевидно, что единых подходов к решению проблем сводообразования нет.

На основании результатов проведенного исследования нами разработана модель, фундаментом которой является представление о материале (грузе) как об отдельных частицах (элементарных ячейках), имеющих размер, сопоставимый со средним размером частиц. Поведение этой ячеистой структуры описано с помощью логико-математического аппарата, основанного на теории вероятности.

В основу модели поведения груза положено утверждение, что все материалы состоят из твердых частиц, объединенных между собой действующими силами, по отношению к которым и рассматриваются расчеты деформируемого материала. Создавая модель поведения материала в емкостях хранения, мы исходим из положения, что частица материала начнет свое движение, только если место соседней ячейки будет вакантным и ее внутренняя энергия будет выше заданного значения.

Разработанная модель поведения груза характеризуется следующими допущениями: груз представляет собой совокупность твердых частиц, одинаковых по форме и физическим характеристикам; движение частиц происходит по траекториям, которые подчиняются одним и тем же законам; между частицами действуют силы трения, взаимодействия и др.; в процессе движения груза в случае превышения минимально допустимых усилий происходит взаимное перемещение отдельных частиц.

Так, в исследуемом материале силы между частицами передаются сплошным потоком через ображаемое пространство. При этом в общем случае внутренние силы непрерывно и неравномерно распределены по этой поверхности. Предложенная модель прошла апробацию в лабораторных и производственных условиях, подтвердив свою работоспособность и эффективность.

Кроме того, в результате проведенного анализа процесса сводообразования и изучения основных способов, приводящих к стимулированию разгрузки слежавшегося материала (груза), нами разработана универсальная конструкция, позволяющая повысить эффективность процесса разгрузки и очистки емкостей хранения сыпучего материала. Предлагаемая конструкция обладает рядом преимуществ перед существующими аналогами, а именно: она может быть использована для большинства типов уже созданных бункеров; она проста в изготовлении и отличается высокой степенью надежности; разработанный разрушитель – очиститель сводов компактен (его размер не превышает 70 см). Данная конструкция хорошо зарекомендовала себя как в лабораторных, так и в производственных условиях: указанный механизм внедрен в производственный процесс вагонного депо ЛВЧД-7 г. Самары.

Для подтверждения истинности результатов проведенного исследования нами разработана компьютерная программа, которая зарегистрирована Роспатентом (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в РОСПАТЕНТЕ № 2011612920). Она позволяет вычислить необходимые характеристики (форма свода, энергозатраты на его разрушение, время разгрузки слежавшихся грузов). Данная программа, работающая по созданному нами алгоритму, демонстрирует процессы, происходящие в бункере при истечении слежавшегося материала с использованием предлагаемой конструкции. Также она позволяет моделировать форму образовавшегося свода в зависимости от физико-механических свойств сыпучей среды и производить расчет времени и количества энергии, необходимых для стимулирования процесса разгрузки. Данная программа дает возможность выбора наиболее эффективного рабочего инструмента для стимулирования разгрузки, а именно: трос, трос с петлей, трос-метла, жесткий рабочий орган.

Таким образом, анализ существующей литературы по проблеме сводообразования при использовании бункеров позволил обобщить опыт эксплуатации и проектирования бункеров, выработать предложения по совершенствованию существующих конструкций, а исследования, направленные на выявление причин образования сводов, обеспечение бесперебойного регулируемого выпуска материалов из емкостей, улучшение ресурсосберегающих показателей процесса выгрузки сыпучих мате-

риалов из бункера и повышение безопасности труда в условиях широкой механизации и автоматизации современного производственного процесса, несомненно, являются сегодня актуальными.

Библиографический список

1. Варламов, А. В. Исходные предпосылки к составлению обобщенной математической модели динамической системы «Бункерное устройство с сыпучим материалом-сводообразование-механизм разрушения сводообразования [Текст] / А.В. Варламов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2 (12). – С. 79–89.
2. Богомягих, В. А., Пепчук, А. П. Интенсификация разгрузки бункерных устройств в условиях сводообразования зернистых материалов [Текст] / В. А. Богомягих, А. П. Пепчук. – зерноград, 1985. – 162 с.
3. Воронин, Н. Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов для железнодорожной техники [Текст] : учебник для вузов ж.-д. транш / Н. Н. Воронин. – М. : Маршрут, 2004. – С. 120–150.
4. Гольденблат, И. И., Копнов, В. А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов [Текст] / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. – М. : Машиностроение, 1968. – 190 с.
5. Горюшинский, И. В. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах [Текст] : учебное пособие / И. В. Горюшинский, [и др.]. – Самара : СамГАПС, 2003. – 232 с.
6. Гячев, Л. В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах [Текст] / Л. В. Гячев. – М. : Машиностроение, 1968. – 184 с.
7. Дальский, А. М. Справочник технолога-машиностроителя [Текст] : в 2-х т. / под ред. А. М. Дальского [и др.]. – М. : Машиностроение, 2001.
8. Драпкин, Б. М. Свойства сплавов в экстремальном состоянии [Текст] : монография / Б. М. Драпкин, В. К. Кононенко, В. Ф. Безъязычный. – М. : Машиностроение, 2004. – 256 с.
9. Зенков, Р. Л. Бункерные устройства [Текст] / Р. Л. Зенков, Г. П. Гриневич, В. С. Исаев. – М. : Машиностроение, 1966. – 234 с.
10. Леденев, В. В. Расчет и конструирование специальных инженерных сооружений [Текст] : учебное пособие / В. В. Леденев, В. Г. Однолюк, А. В. Худяков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 128 с.
11. Сопrotивление материалов : учеб. для вузов [Текст]. – 2-е изд. испр. – М. : Высш. шк., 2000. – С. 10–100.
12. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя [Текст] / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Varlamov, A. V. Ishodny'ye predposy'lki k sostavleniyu obobshchennoy matematicheskoy modeli dinamiche-skoj sistemy' «Bunkernoye ustroystvo s sy'puchim materialom-svodoobrazovaniye-mehanizm razrusheniya svodo-obrazovaniya [Tekst] / A. V. Varlamov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2011. – № 2 (12). – S. 79–89.
2. Bogomyagkih, V. A., Pepchuk, A. P. Intensifikatsiya razgruzki bunkerny'h ustroystv v usloviyah svodoobra-zovaniya zernisty'h materialov [Tekst] / V. A. Bogomyagkih, A. P. Pepchuk. – Zernograd, 1985. – 162 s.
3. Voronin, N. N. Materialovedeniye i tehnologiya konstruksionny'h materialov dlya zheleznodorozhnoy tehnik [Tekst] : uchebnik dlya vuzov zh.-d. transh / N. N. Voronin. – M. : Marshrut, 2004. – S. 120–150.
4. Gol'denblat, I. I., Kopnov, V. A. Kriterii prochnosti i plastichnosti konstruksionny'h materialov [Tekst] / I. I. Gol'denblat, V. A. Kopnov. – M. : Mashinostroyeniye, 1968. – 190 s.
5. Goryushinskiy, I. V. Yemkosti dlya sypuchih грузов v transportno-gruzovy'h sistemah [Tekst] : uchebnoye po-sobiye / I. V. Goryushinskiy, [i dr.]. – Samara : SamGAPS, 2003. – 232 s.
6. Gyachev, L. V. Dvizheniye sy'puchih materialov v trubah i bunkerah [Tekst] / L. V. Gyachev. – M. : Mashinos-troyeniye, 1968. – 184 s.
7. Dal'skiy, A. M. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya [Tekst] : v 2-h t. / pod red. A. M. Dal'skogo [i dr.]. – M. : Mashinostroyeniye, 2001.
8. Drapkin, B. M. Svoystva splavov v ekstremal'nom sostoyanii [Tekst] : monografiya / B. M. Drapkin, V. K. Ko-nonenko, V. F. Bez'yazychny'y. – M. : Mashinostroyeniye, 2004. – 256 s.
9. Zenkov, R. L. Bunkerny'ye ustroystva [Tekst] / R. L. Zenkov, G. P. Grinevich, V. S. Isayev. – M. : Mashino-stroyeniye, 1966. – 234 s.
10. Ledenev, V. V. Raschet i konstruirovaniye spetsial'ny'h inzhenerny'h sooruzheniy [Tekst] : uchebnoye posobiye / V. V. Ledenev, V. G. Odnol'ko, A. V. Khudyakov. – Tambov : Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2007. – 128 s.
11. Soprotivleniye materialov : ucheb. dlya vuzov [Tekst]. – 2-ye izd. ispr. – M. : Vy'ssh. shk., 2000. – S. 10–100.
12. Suslov, A. G. Tehnologicheskoye obespecheniye parametrov sostoyaniya poverhnostnogo sloya [Tekst] / A. G. Suslov. – M. : Mashinostroyeniye, 1987. – 208 s.