

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Горохов Евгений,
Украина, Макеевка, Президент УАМК

Пермяков Владимир,
Украина, Киев, Вице-президент УАМК

Ажермачев Геннадий,
Украина, Симферополь

Белый Григорий,
Россия, Санкт-Петербург

Брахам Марк,
Люксембург, Декирх

Волчук Роман,
США, Джерси-сити

Гарф Едуард,
Украина, Киев

Ермак Евгений,
Украина, Харьков

Зюлко Ежи,
Польша, Гданськ

Казакевич Михаил,
Украина, Днепрпетровск

Кведарас Аудронис,
Литва, Вильнюс

Колесниченко Сергей,
Украина, Макеевка

Королёв Владимир,
Украина, Макеевка

Ларионов Владимир,
Россия, Москва

Мущанов Владимир,
Украина, Макеевка

Недосека Анатолий,
Украина, Киев

Перельмутер Анатолий,
Украина, Киев

Пичугин Сергей,
Украина, Полтава

Похмурский Василий,
Украина, Львов

Шебанин Вячеслав,
Украина, Николаев

Шимановский Александр,
Украина, Киев

Югов Анатолий,
Украина, Макеевка

ТОМ 5 • НОМЕР 1 • 2002

Журнал издается на украинском, русском и английском языках.
Перепечатка, копирование и воспроизведение всех материалов
журнала возможны только с письменного разрешения редакции.

© 2002 УАМК. Отпечатано в Украине. Все права защищены.

e-mail: mc-journal@dgasa.dn.ua

<http://sci.dgasa.dn.ua/uamc>

**Журнал
«Металеві Конструкції»**

основан

Украинской Ассоциацией по
металлическим конструкциям

Адрес:

Редколлегия журнала
«Металлические конструкции»,
ДонГАСА, ул. Державина, 2,
г. Макеевка-23, Донецкая область,
86123, Украина.

Телефакс:

+38 (062) 338-03-96,
+38 (0623) 22-06-16

Президент УАМК

Горохов Евгений,
+38 (062) 338-03-96,
+38 (06232) 6-13-01,
+38 (0622) 90-29-38

Главный редактор

Югов Анатолий
+38 (06232) 4-06-44,
+38 (0622) 90-17-22

Научный редактор

Мущанов Владимир
+38 (0622) 21-41-59,
+38 (06232) 6-13-03

Технический редактор

Колесниченко Сергей
+38 (0623) 22-06-16

Помощь в подготовке номера

Зайцев Евгений

**Вёрстка и дизайн
оригинал-макета**

Гавенко Сергей

Регистрационное свидетельство

Министерства информации
Украины КВ-3303
от 17.06.1998 года

Подписано в печать
11 декабря 2002 года
Отпечатано в РИС ОМС
Донбасской государственной академии
строительства и архитектуры

Тираж 450 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

ТОМ 5 №1, 2002

- 5 Исследование поля ветрового эффекта ветряных машин USW-56-100 на Новоазовской ветроэлектростанции
Е.В. ГОРОХОВ, А.М. ЮГОВ, Ю.П. НЕКРАСОВ, С.В. ТУРБИН, С.В. КОЛЕСНИЧЕНКО (УКРАИНА)
- 11 Учёт ухудшения технических свойств, включая характеристики сопротивления растрескивания стали при оценивании остаточного срока при оценивании срока службы металлических конструкций
В.М. ГОРИЦКИЙ (РОССИЯ)
- 15 Динамика стальных конструкций (жизненный цикл, диагностика, контроль, образцы и вычисления)
В.В. КУЛЯБКО, И.И. ДАВЫДОВ (УКРАИНА)
- 23 Оценивание повреждений и восстановления пригодности труб для удаления отработанного пара на Чернобыльской атомной станции
А.В. ПЕРЕЛЬМУТЕР, М.П. КОНДРА, М.А. МИКИТАРЕНКО, Г.П. ДЕНИСЕНКО, П.П. ТУРЧИН (УКРАИНА)
- 27 Экспериментальное и теоретическое изучение напряженного состояния соединений резервуара, работающего на эластично-пластиковой площадке
В.Ф. МУЩАНОВ, А.А. КУЛИК (УКРАИНА)
- 33 Зонирование территории Украины по ветровой и ледовой нагрузке
Е.В. ГОРОХОВ, С.В. ТУРБИН (УКРАИНА)
- 37 Некоторые аспекты прочности стали в существующих структурах
С.Ф. ПИЧУГИН (УКРАИНА)
- 43 Оптимальная конструкция металлических каркасов зданий с использованием модульных форм
И.С. ХОЛОПОВ, Р.В. СЕНИНГ (РОССИЯ)
- 53 Исследование балочного железнодорожного моста на повреждения
М.Ф. МУЩАНОВ, И.В. РОМЕНСКИЙ, С.В. КОЛЕСНИЧЕНКО, А.М. ЮГОВ (УКРАИНА)
- 59 Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов
М.И. КАЗАКЕВИЧ, Д.О. БАННИКОВ (УКРАИНА)
- 67 Сравнение результатов аэродинамических исследований с различной степенью моделирования рельефа поверхности подстилания
Р.И. КИНАШ, С.С. ЖУКОВСКИЙ, В.А. КОВАЛЕНКО (УКРАИНА)
- 71 Оценка периодичности технических обследований нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации
Е.А. ЕГОРОВ, С.С. СЕМЕНЕЦ (УКРАИНА)
- 75 Распределение остаточного напряжения в секциях составляющих предварительно напряженных металлических балок
А. ГОЛОДНОВ, И. ФИЛАТОВА (УКРАИНА)
- 79 Характерные повреждения металлургических мостовых кранов
И.Р. РУХОВИЧ, К.Б. МНАЦАКАНЯН, А.Ю. ПОГОРЖЕЛЬСКИЙ, С.Н. МИШУРА (УКРАИНА)
- 85 влияние безразмерного пространственно жесткостного параметра внешнего опорного контура на безразмерные параметры НДС оболочки с большим вырезом
Е.В. ГОРОХОВ, В.Ф. МУЩАНОВ, В.Р. КАСИМОВ (УКРАИНА)
- 89 Анализ первых лет работы украинских ветроэлектрических станций
Е.В. ГОРОХОВ, Ю.В. ЖАВСКИЙ, С.В. ТУРБИН, М.В. БУСЬКО (УКРАИНА)
- 97 Оценка безопасности эксплуатируемых сооружений на основе понятия третьего предельного состояния
Е.В. ГОРОХОВ, В.Ф. МУЩАНОВ, А.М. ЮГОВ, В.Т. ГОРЛЫШКИН, Е.В. ШЕЛИХОВА (УКРАИНА)

МЕТАЛЕВІ _____
КОНСТРУКЦІЇ _____

Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов

М.И. Казакевич, Д.О. Банников

Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, Украина, 40629, г. Днепропетровск, ул. Академика Лазаряна, 2

У статті наведена детальна класифікація й аналіз причин аварій жорстких сталевих бункерів та низьких силосів як самостійних класів листових конструкцій. Подані дані були зібрані з багатьох вітчизняних і закордонних джерел, включаючи як окремі монографії з проблем аварій будівельних конструкцій, звіти про обстеження реальних конструкцій, так і спеціальну нормативно-довідкову літературу. Матеріал статті розташований відповідно до послідовного розкриття основних причин аварій сталевих бункерів і силосів. Його виклад супроводжується конкретними прикладами аварій і відмов конструкцій, ілюстрованих рисунками та фотографіями. © 2002 УАМК.

В статье приводится детальная классификация и анализ причин аварий жестких стальных бункеров и низких силосов как самостоятельных классов листовых конструкций. Представленные сведения были собраны из множества отечественных и зарубежных источников, включая как отдельные монографии по проблемам аварий строительных конструкций, отчеты об обследованиях реальных конструкций, так и специальную нормативно-справочную литературу. Материал статьи расположен в соответствии с последовательным раскрытием основных причин аварий стальных бункеров и силосов. Его изложение сопровождается конкретными примерами аварий и отказов конструкций, иллюстрированных рисунками и фотографиями. © 2002 УАМК.

The paper is devoted to the detail classification and analysis of reasons of failures, which are typical for the steel rigid bunkers and the low silos. The presented data were collected from many native and foreign sources including both the monographs on the problems of crashes and failures of building structures, reports about the investigations of the real constructions and a special normative-reference literature. The material of the paper is situated according to the main reasons of the failures of the steel bunkers and the silos. It is supported with the real examples of failures and crashes of the structures and illustrated with pictures and photos. © 2002 УАМК.

(Ключевые слова: бункер, силос, авария, причина аварии)

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Во многих отраслях промышленности, сельского хозяйства, на транспорте используются конструкции особого типа, называемые листовыми. Стальные листы в них составляют главную часть сооружения, образуя пространственные оболочки. Основное предназначение таких конструкций заключается в хранении или технологической переработке газообразных, жидких и сыпучих веществ. Поэтому, в конструктивном отношении все они представляют собой емкости.

Не исключением являются и стальные бункера, а также родственные им по классу конструкций невысокие силосы, проектируемые для работы с сыпучими материалами. История их применения насчитывает уже свыше ста лет. Однако за все это время стальные бункера и силосы не перепели принципиальных конструктивных изме-

нений, как, впрочем, и сама методика их расчета и конструирования. Этот факт как нельзя лучше свидетельствует о том, что эти конструкции в настоящее время являются одним из наименее изученных видов строительных конструкций, большая часть аспектов работы которых пока остается в тени исследований.

Статистика аварий стальных бункеров и низких силосов полностью подтверждает это. Однако, прежде чем подробнее соприкоснуться с ней, отметим несколько особенностей затронутой сферы в целом.

Во-первых, авторы полностью разделяют бытующее мнение о том, что обнаружить зло – почти то же, что найти против него лекарство. Поэтому, представленный материал может послужить хорошим поводом задуматься для специалистов и инженеров, так или иначе связанных с конструкциями такого и аналогичного типов.

Во-вторых, следует отметить, что специальная литература по данной проблематике совсем не пестрит сведениями об авариях стальных бункеров и силосов. Однако это вовсе не связано с тем, что они редко происходят. Дело в том, что бункера и силосы являются довольно рядовыми сооружениями ввиду своих скромных размеров¹ и расположены на таких участках технологических процессов, которые не предполагают нахождения поблизости людей, тем более – их скопления. Для повышения эффективности работы бункера и силосы группируют друг с другом. Ясно, что выход из строя одного из них незначительно скажется на ходе технологического процесса, и только в исключительном случае может привести к его остановке. Поэтому, аварии бункеров и силосов – процесс, так сказать, незрелищный, о котором невозможно было бы снять импозантный фильм и не влекущий за собой больших человеческих жертв, а значит, из которого трудно сделать показательный пример в литературе.

К тому же, бункера являются неотъемлемым объектом таких производств, которые довольно часто носят стратегический характер, а значит, и все сведения о которых не подлежат широкой огласке. Кроме этого, само правдивое описание всех имевших в практике место аварий подорвало бы авторитет соответствующих строительных и проектных организаций и нанесло бы им материальный ущерб.

В связи с этим, нужно признаться, что авторам стоило немалых трудов собрать необходимые сведения, позволившие обобщить и проанализировать современное положение вещей в данной сфере. В своей работе они старались не доверять и не использовать данные, которые невозможно было бы проверить, а представленный в данной публикации материал имеет точные ссылки на источники, из которых он был позаимствован.

2. ОБЩИЕ ПРИЧИНЫ АВАРИЙ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Когда разговор заходит об авариях, прежде всего, начинают с их классификации по каким-либо признакам. Традиционно принято разделять аварии строительных конструкций либо по причинам, их вызвавшим, либо по характеру повреждения и разрушения элементов.

Относительно первого подхода известно довольно много попыток классификаций у различ-

ных авторов [1 – 5]. Так, любопытен подход Томаса Х. Мак Кейга выделяющего пять основных причин аварий, связанных, главным образом, с человеческим фактором: невежество, экономия, погоня за прибылью, небрежность и стихийные бедствия. Классификация Мизюмского И.А., напротив, отражает только технический аспект. Он выделяет четыре причины аварий: ошибки проектирования, изготовления, эксплуатации и от недостатка знаний. Известный советский исследователь Дмитриев Ф.Д. совершенно справедливо их примирляет, считая, что аварии происходят либо ввиду несовершенства инженерно-технических приемов, либо связаны с социально-экономическими условиями, либо есть следствие объективных природных явлений.

Однако, как известно из опыта, в большинстве случаев авария есть результат наложения нескольких причин, и выделить главную из них, оказавшую решающее влияние, иногда довольно затруднительно. Кроме этого следует различать основную и непосредственную причины аварий,¹ что вносит определенную долю условности во всякую классификацию.

С точки зрения исследователей, к которым авторы осмеливаются причислить и себя, и инженерно-технических работников интерес, в первую очередь, представляют технические причины, предполагающие улучшающее вмешательство в конструктивную систему. В количественном отношении полезные данные об их усредненном процентном распределении приведены в работе [6] (в скобках приведен диапазон вариации по данным различных источников):

- 1) недоработка норм проектирования – **4,0%** (0-10%);
- 2) неудачное проектное решение – **25,1%** (11-35%);
- 3) низкое качество материалов – **6,0%** (0-14,7%);
- 4) дефекты изготовления и монтажа – **48,3%** (38,8-65%);
- 5) неправильное содержание – **15,7%** (7-25%);
- 6) прочие причины и сочетания – **0,3%** (0-2%).

Второй подход к классификации аварий по характеру разрушения элементов менее удобен, поскольку не дает необходимой информации для определения надежностных характеристик сооружений. Поэтому, в данной работе он не рассматривается.

Все вышеизложенные причины аварий характерны для любых строительных конструкций, а значит, справедливы и для стальных бункеров. Вместе с этим, наряду с общими причинами, для каждого отдельного вида конструкций характерны и свои специфические причины аварий, свои типичные ошибки и просчеты, которые вносят определенный перекокс в среднестатистические данные для рассматриваемого вида конструкций. При-

¹ Максимальный на сегодняшний день известный авторам стальной бункер пирамидально-призматического типа имеет размеры 15×18м в плане при общей высоте порядка 9 м и расположен на КГМК «Криворожсталь».

вести их для стальных бункеров и силосов не представляется возможным по причине недостаточности накопленных статистических сведений, поэтому рассмотрим лишь качественную сторону данного явления.

3. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ АВАРИЙ СТАЛЬНЫХ БУНКЕРОВ И СИЛОСОВ

При описании аварий стальных бункеров и силосов и анализе их причин будем следовать вышеприведенной классификации, которая является достаточно общей и понятной.

3.1. Ошибки, связанные с проектированием.

Все основные специфические причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов связаны с недостатками проектирования, т.е. входят в группы 1 и 2 общих причин аварий стальных конструкций.

Одна из причин такого рода связана с **неверным определением нагрузок на конструкцию бункера**. В настоящее время она имеет два аспекта. Первый из них заключается в том, что *определяющим видом нагрузки при проектировании бункеров и силосов считается давление сыпучего материала, оказываемое им на дно и стенки емкостей, а по его определению среди специалистов в настоящее время нет единого мнения*.

Рекомендуемый отечественной нормативно-справочной литературой подход к определению давления при расчете бункеров предполагает использование теории предельного равновесия Рэнкина для неограниченного массива грунта без учета сил трения материала о стенки [7]. При этом во

внимание принимается только статическая сторона задачи, а сама теория справедлива лишь для вертикальных стенок. Конечная эпюра давления имеет гидростатический вид с максимумом в нижней точке (дно бункера).

Американская школа в настоящее время, также, допускает применение такого подхода. Однако в качестве альтернативы позволяет использование и более общей теории Кулона, учитывающей трение материала о стенки и справедливой и для наклонных стенок [8]. Эта теория, также, рассматривает только статическую сторону задачи. Кроме этого, допускается применять теории Янсена и Рамберта, предполагающие постоянную геометрию сосуда по высоте и учитывающие силу трения материала о его стенки. Поскольку доказано, что обе эти теории дают заниженные значения давлений, то вводятся специальные поправочные коэффициенты. Суммарная эпюра давления имеет вид качественно отличный от гидростатического, но максимум опять имеет место в нижней точке (дно бункера). Такой подход отечественная школа рекомендует использовать только для проектирования силосов, причем дает иные поправочные коэффициенты, отличающиеся в 1,5-2 раза от американских [9].

Европейская школа, наиболее продвинутая в данном плане, на основе многолетних исследований дает довольно сложную картину распределения давления сыпучего материала [10]. При этом учитывается трение материала о стенки сосуда, форма и размеры сосуда, а также, эффект местного повышения давления при выгрузке сыпучего. Формулы для вычисления его величины носят полуэмпирический характер. Суммарная эпюра распределения давления имеет вид качественно

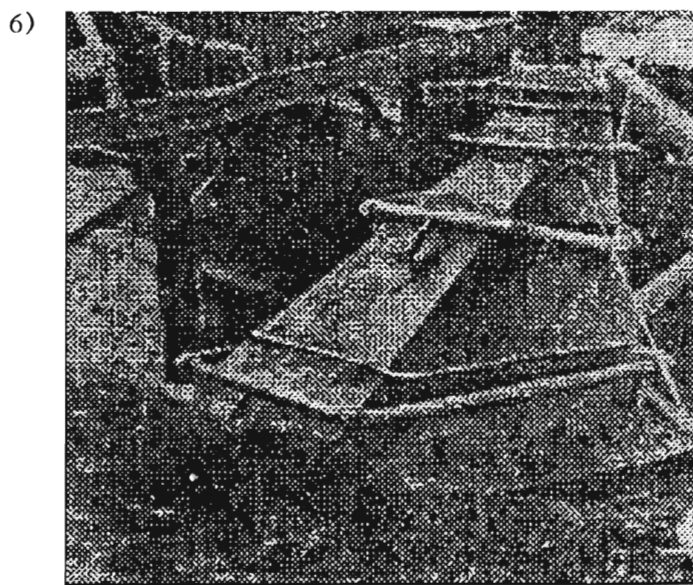
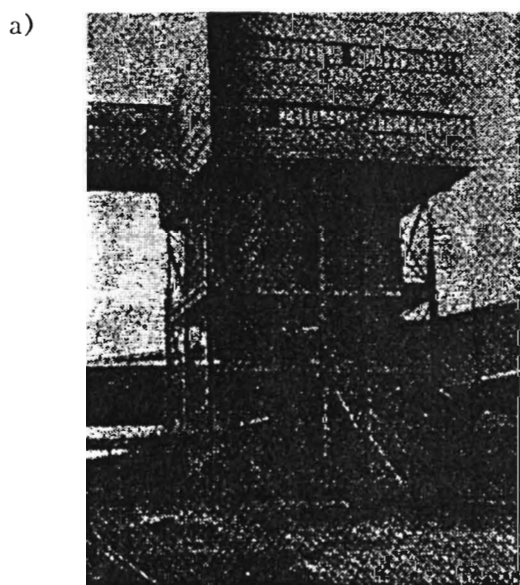


Рис. 1. Вид бункера для хранения цемента до обрушения (а) и после обрушения (б).

отличный от двух предыдущих: перевернутая гидростатическая (максимальное значение имеет место в верхней точке воронки бункера!) с учетом целого набора локальных всплесков.

Не стоит и говорить о том, что в количественном плане значения давления, посчитанного по каждой из методик, отличается в разы (до 5 раз). Дополнительная погрешность вносится за счет того, что довольно часто при определении давления используют не фактические, а усредненные характеристики сыпучих материалов, приводимые в нормативно-справочной литературе. Причем по данным различных источников для одних и тех же материалов они также различны (отличие в удельном весе, например, может достигать до 50%). Поэтому, задача верного определения давления сыпучего материала на дно и стенки сосуда является одной из первостепеннейших и актуальнейших в проблеме рационализации конструкции бункеров и силосов.

Так, в работе [1] приводится пример обрушения бункера для хранения цемента размерами 4,4×3,8×8,5 м, произошедший после нескольких дней его эксплуатации. При очередной загрузке произошел отрыв воронки в месте ее присоединения к вертикальной части. Воронка рухнула на площадку обслуживания, которая в свою очередь разрушилась и упала на стоящий внизу вагон (рис. 1).

В качестве одной из причин аварии как раз и указывается «...ошибочно принятая величина расчетной нагрузки...». Однако, помимо неверно определенного давления от сыпучего материала, в расчетах не учитывалось избыточное давление воздуха при аэрации¹, а в качестве непосредственной причины аварии указывается на внезапное обрушение зависшей массы цемента внутри бункера.

Точно такие же причины привели в 1951 г. к аварии сварного цементного силоса на Магнитогорском цементном заводе, описанной в работе [2]. Во время погрузки цемента из стального силоса в железнодорожные вагоны у силоса оторвалось коническое днище и рухнувшим цементом были произведены большие разрушения конструкции самого силоса, кирпичных стен силосного отделения, воздушных и электрических сетей и железнодорожного состава, находящегося под погрузкой. Силос имел объем 1830 м³ и находился в эксплуатации 2,5 месяца.

¹ Цемент при хранении обладает свойством слеживаться, что серьезно затрудняет его выгрузку. Поэтому, применяют один из вариантов системы Проха, заключающейся в организации в нижней части сосуда системы мелких отверстий, через которые под давлением нагнетается воздух, разрыхляющий массу цемента.

На неверное определение давления от хранимого в силосах зерна указывается и при разборе причин целой серии аварий зернового элеватора, произошедших в 1961 г. [5]. Силосы были выполнены из железобетона, но это только лишний раз демонстрирует общность данной проблемы.

На этих примерах довольно наглядно прослеживается и второй аспект указанной выше проблемы определения нагрузок, а именно – *существенное заужение спектра учитываемых при проектировании нагрузок и воздействий*.

Например, европейская школа помимо общих для многих строительных конструкций нагрузок от собственного веса сооружения, ветра, снега, рекомендует учитывать и ряд специфических:

- воздействие технологических температурных нагрузок от загрузки нагретого сыпучего материала и связанное с этим возможное изменение физико-механических характеристик стали;
- ударные нагрузки, возникающие при падении больших кусков материала при загрузке бункеров и силосов, при обрушении сводов или склонов сыпучего внутри конструкции, при его неравномерной осадке;
- нагрузки от повышенного воздушного давления, возникающего при быстрой разгрузке и загрузке большого количества сыпучего материала с относительно низкой фильтрационной способностью для газов;
- нагрузки от возможного взрыва пылевидной фракции хранимого сыпучего (это касается, правда, только взрывоопасных материалов);
- эффекты изменения во время хранения физико-механических свойств материала вследствие процессов консолидации, сегрегации и дегградации сыпучего;
- нагрузки, возникающие при применении специальных разгрузочных устройств, облегчающих процесс разгрузки плохосыпучих материалов.

Проблема здесь заключается не только в том, что недостаточно исследована специфика этих нагрузок и воздействий как применительно к конструкции бункеров и силосов, так и в целом на физическом уровне. Как показывают исследования, стенки стальных пирамидально-призматических бункеров необходимо рассчитывать по геометрически нелинейной схеме, иначе происходит существенное искажение получаемых результатов (см., например, [11]). При этом возникает проблема совместного учета различных нагрузок, ведь применение традиционного принципа суперпозиции уже будет являться в корне неверным.

Отечественная нормативно-справочная литература упрощает ситуацию донельзя, рекомендуя все вышеперечисленные эффекты учитывать введением одного-единственного коэффициента динамич-

ности, значения которого зависят только лишь от объема единовременно загружаемого в бункер материала и варьируются в диапазоне 1-1,5. Становится понятным идея такого упрощенного подхода, если вспомнить сколько разночтений наблюдается по вопросу определения давления от сыпучего.

В качестве второй специфической причины аварий стальных бункеров пирамидально-призматического типа можно выделить **неверное назначение сечений элементов**. Как и предыдущая, данная причина также имеет два аспекта.

Первый из них следует трактовать не как следствие предыдущей причины (хотя связь между ними прямая и неоспоримая), а как **результат применения неверной методики расчета, связанной с недостаточной изученностью и неверной трактовкой работы элементов конструкции бункера и силоса**.

Так, в качестве второй основной причины уже упоминавшейся аварии бункера для цемента указывается ошибочно принятое распределение усилий в зоне состыковки воронки с вертикальной частью, в результате чего отрыв произошел именно в этом месте. Точно такая же ситуация наблюдалась и на бункерах Кузнецкого и Челябинского металлургических комбинатов. Достаточно уязвимой является и зона соединения ребер жесткости воронки в углах друг с другом, быстро приходящая в негодность и потому требующая замены (см., также, рис. 3, в).

Дело в том, что официальная применяемая в настоящее время инженерная методика проектирования стальных бункеров рассматриваемого типа, впрочем как и остальных видов листовых конструкций (в т.ч. и силосов), основана на условном разделении единой конструкции на отдельные простые элементы с последующим расчетом их по элементарным плоским расчетным схемам. Такой подход, дающий приемлемые результаты для иных видов строительных конструкций (например, каркасы промышленных зданий), приводит к огромным погрешностям в случае небольших простран-

ственных конструкций, которыми являются бункера и низкие силосы.

Как показали исследования, проведенные авторами с применением метода конечных элементов, действительная картина напряженно-деформированного состояния и в качественном и в количественном плане существенно отличается от получаемой по традиционной методике. В частности, зонами наибольших напряжений являются места присоединения ребер жесткости к стенкам воронки, соединения их друг с другом в углах бункера, соединения стенок, а не как обычно предполагается — участки стенок в пролетах между ребрами. Передача усилий в месте соединения вертикальной и пирамидальной частей происходит довольно неравномерно, с большой концентрацией их в приугловых зонах бункера. Вертикальные стенки бункеров оказываются сжатыми и при этом не могут быть рассчитаны без учета влияния воронки (подробнее см., например, публикации [12, 13]).

В качестве оправдания приводится примерно следующее, дескать, зачем уточнять методику, если сперва следует уточнять нагрузки; ну а раз с нагрузками неопределенность, то пусть методика ее и перекроет. А если не перекроет?! Ведь, Природа не всегда прощает подобную трактовку ситуации, результатом чего и являются констатируемые случаи аварий.

Второй аспект проблемы неверного назначения сечений элементов стальных бункеров связан с довольно типовой в проектной практике ситуацией типа «**чрезмерное расширение сферы применения**». Так, по данным работы [5] в октябре 1973г. в одном из совхозов произошло обрушение стального бункера-накопителя, входящего в состав зерноочистительного комбината и эксплуатировавшегося до этого всего 12 дней (рис. 2). Размер бункера 8×12×7м, масса 33 т, вместимость 600 т зерна. Обрушение бункера произошло внезапно в безветренную погоду при наличии в нем 430 т зерна. Он обрушился с наклоном в сторону машинного зала зерноочистительного комплекса, стойки по-

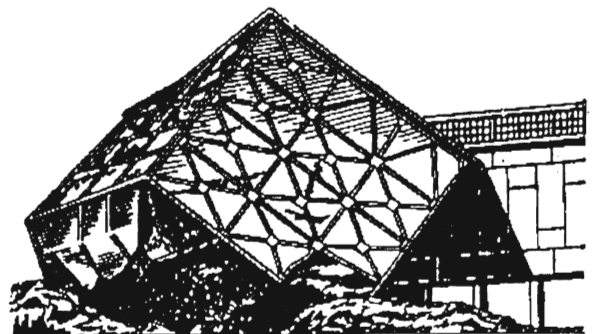
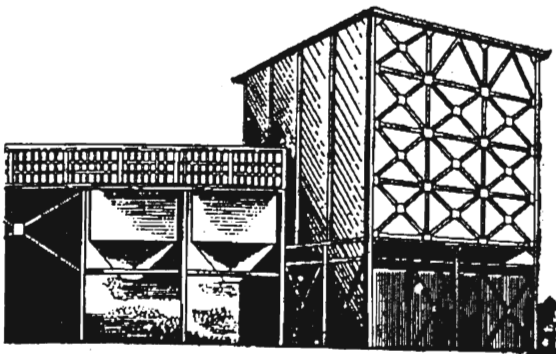


Рис. 2. Бункер-накопитель до обрушения (а) и после обрушения (б).

лучили значительные искривления с изгибом на 180° , но без разрыва стали.

Проверочные расчеты конструкции самого бункера, выполненные по нормам проектирования стальных конструкций, показали, что она обладает достаточной прочностью. Что касается стоек, то их гибкость пассивно превышала требуемую. Именно в этом и состояла единственная в данном случае причина аварии. Бункер-наконитель был построен без проекта по эскизам, снятым с такого же бункера, построенного ранее в другом совхозе. При этом высота стоек была увеличена с 4 до 5,3 м без выполнения надлежащих проверочных расчетов. Вдобавок, изготовлением и монтажом бункера руководили лица, не имевшие технического образования, и поэтому не заметившие допущенного просчета.

Другим показательным примером на данную тему является бункерная эстакада доменного цеха комбината «Криворожсталь». Выполненное в 1995-1997 гг. ее обследование авторской проектной организацией «Днепрпроектстальконструкция» сделало следующие выводы: техническое состояние 5 бункеров эстакады из 16 может быть оценено как неудовлетворительное, т.к. их элементы находятся

в ограниченно работоспособном состоянии; техническое состояние остальных бункеров оценено как крайне неудовлетворительное — их элементы находятся в аварийном состоянии [14].

Все бункера пирамидально-призматического типа были выполнены по единой конструктивной схеме с седловидной рамой по центру, были сданы в эксплуатацию в 1976 г. Их основная отличительная особенность — гигантские для такого вида конструкций размеры: $15 \times 18 \times 9$ м, масса около 100 т, объем свыше 1000 м^3 . В числе отмеченных дефектов, на которых мы подробнее остановимся ниже, фигурировали и разрывы узлов стыковки элементов седловидной рамы друг с другом и с элементами эстакады, в результате чего рама полностью выключилась из работы в качестве несущего элемента. Аварии удалось избежать лишь благодаря тому, что как оказалось, рассчитанные по все той же официальной методике бункера в данном случае обладали значительным запасом прочности, а благодаря вовремя замеченным неисправностям интенсивность их эксплуатации резко снизилась.

Действительная причина возникшей ситуации, заваленная кажущимися просчетами проек-

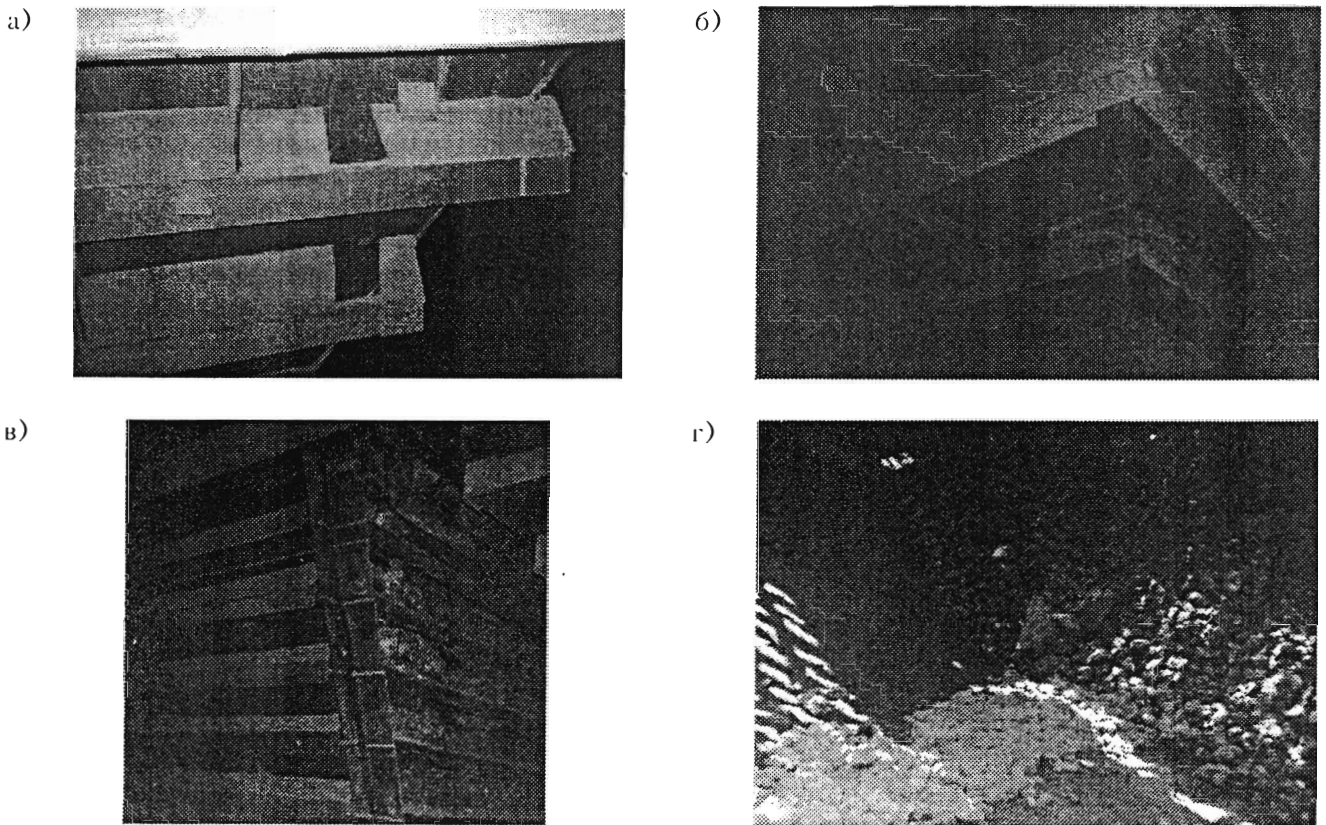


Рис. 3. Дефекты конструкции бункеров комбината «Криворожсталь»:

- а) неверная стыковка ребер жесткости воронки со стенкой;
- б) трещины и прогибы ребер жесткости воронки;
- в) замена изношенной угловой зоны стыковки ребер жесткости, трещины и прогибы ребер;
- г) отсутствие футеровки на стенке воронки.

тировщиков, заключается в неверной трактовке в принципе прогрессивной идеи концентрации материала в строительных сооружениях, сформулированной в 30-е гг. XX в. академиком Мельниковым Н.П. Она вылилась в создание сверхкрупных объектов,¹ процесс проектирования которых не подкреплялся необходимыми в этих случаях, ввиду значительного влияния масштабного фактора, теоретическими исследованиями. Поэтому, имея опыт проектирования лишь небольших бункеров (до 200-300 м³), заложенный в официальной методике, данные большеразмерные бункера были спроектированы по тем же принципам, без необходимой в этих случаях корректировки и уточнения методики.

3.2. Ошибки, связанные с изготовлением и монтажом

В данном разделе рассмотрим аварии, причины которых относятся к 3 и 4 группам общих причин аварий стальных конструкций.

Продолжая анализировать пример из предыдущего раздела о бункерах комбината «Криворожсталь» приведем список основных дефектов, выявленных при их обследовании. Он включает: многоочаговую пятнистую коррозию стенок бункеров вплоть до сквозной (средний размер пятен 600×200 мм); трещины и отверстия в стенках бункеров, средним размером 300×600 мм; многочисленные зазоры между стыкуемыми элементами, величиной до 50-70 мм; отсутствие сварных швов на отдельных участках, длиной до 1,5 м; многочисленные повреждения ребер – обрывы и деформации полок, вырезы и отверстия в полках и стенках; выполнение ряда узлов не по проекту (рис. 3).

Появление этих дефектов обусловлено отчасти коррозионным воздействием и некорректным монтажом, отчасти ударными воздействиями при загрузке-выгрузке сыпучего. Особую группу составляют вырезы и отверстия, сделанные рабочими при проведении ремонтных работ для возможности крепления необходимого оборудования, естественно, без каких-либо предварительных расчетов.

Как видим, причины довольно стандартные. Их можно наблюдать очень часто, но относительно стальных бункеров и силосов они приобретают особую остроту, поскольку они, как и все листо-

вые конструкции, имеют довольно значительную протяженность сварных швов. Общеизвестно же, что 80% разрушений металла в конструкциях происходит именно по ним (см., также, пример из работы [2]).

3.3. Ошибки, связанные с эксплуатацией.

Рассмотрим специфику последней, пятой группы общих причин аварий стальных конструкций применительно к жестким стальным бункерам и силосам.

Главный подводный камень, в данном случае, связан с необходимостью постоянно поддерживать в рабочем состоянии футеровку стенок конструкций. Как показывает практика, ее износ может быть довольно существенным, и на незащищенных местах сразу же начинается интенсивная коррозия стальных листов стенок бункеров, отрицательно сказывающаяся на прочностных свойствах конструкции. Так, по данным работы [15] коррозионный износ достигает величины 17,3% толщины стенки конструкции за 50 лет эксплуатации в условиях промышленного предприятия Польши. На бункерах же комбината «Криворожсталь» он по данным обследований составлял 7-12% толщины стенки, в местах же с нарушенной футеровкой достигал величины 23-28% (за 20 лет эксплуатации).²

На основе этих и многих других примеров мы лишний раз видим, как небрежность и невежество (по классификации Томаса Х. Мак Кейга) оказываются довольно близки к тому, чтобы сослужить людям плохую службу.

4. ТАКИМ ОБРАЗОМ ...

Таким образом, главные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов связаны с проектной стороной жизненного цикла конструкций. Основные дефекты при этом заключаются в неверном выборе конструктивной, а затем и расчетной схем. Ошибки такой категории являются исключительно опасными, поскольку оказываются присущи каждому спроектированному бункеру или силосу в отдельности. Не случайно большинство описанных в данной публикации аварий произошло именно в первое время после сдачи сооружений в эксплуатацию.

Дальнейшая же судьба тех конструкций стальных бункеров и силосов, запас прочности в которых, заложенный проектировщиками, оказался достаточен для несения эксплуатационных нагрузок, в значительной степени оказывается зависящей от случайного сочетания различных факторов изготовления и эксплуатации, оказывающих крайне неблагоприятное воздействие на надежностные свойства конструкций при печально извест-

¹ Рассматриваемая бункерная эстакада проектировалась под гигантскую доменную печь, объемом 5000 м³.

² Отметим попутно, что инженеры знакомы с данной ситуацией, поэтому они сознательно завышают размеры сечений элементов против расчетных, перестраховывая себя, хотя действующими нормами это и запрещено.

твом отечественно качеству выполнения строительного-монтажных работ.

Особая проблема проектирования стальных бункеров и силосов заключается в необходимости проведения большого объема исследований, связанных с уточнением механизма и характера действия большого количества возможных в практике нагрузок и воздействий, с одной стороны, и уточнение работы самой конструкции как сложной пространственной конструктивной системы, с другой стороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аугустин Я., Шледзевский Е. Аварии стальных конструкций. Пер. с польского. — М.: Стройиздат. — 1978. — 183с.
2. Беляев Б.И., Корниенко В.С. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения. — М.: Издательство литературы по строительству. — 1968. — 208с.
3. Лащенко М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений. — Л.: Издательство литературы по строительству. — 1969. — 184с.
4. Сахновский М.М., Титов А.М. Уроки аварий стальных конструкций. — К.: Будівельник. — 1969. — 200с.
5. Шкинев А.Н. Аварии в строительстве. — М.: Стройиздат. — 1984. — 320с.
6. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. — К.: Изд-во УкрНИИПроектстальконструкция. — 1999. — 212с.
7. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. — М.: Стройиздат. — 1983. — 200с.
8. Structural Engineering Handbook / Edited by Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer. — McGraw-Hill. — 1997.
9. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: В 3 т. / Под ред. В.В. Кузнецова. — Т.2: Стальные конструкции зданий и сооружений. — М.: Изд-во АСВ. — 1998. — 526 с.
10. ESDEP WG: Vol. 15. — 1994. — Vol. 15: Structural Systems. Bins: Lecture 15C.2. — 31 p.
11. Банников Д.О. Выбор параметров конечных элементов при численном моделировании пирамидально-призматических бункеров // Сб. научн. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. — Днепродзержинск: ПГАСА. — 2000. — Вып. 11. — С. 126-133.
12. Казакевич М.И., Кострица С.А., Банников Д.О. Напряженно-деформированное состояние стального пирамидально-призматического бункера // Вестник: Строительные конструкции. Здания и сооружения. — Донецк: ДГАСА. — 1998. — Вып. 98-4(12). — С. 37-44.
13. Банников Д.О. Прочностные и динамические свойства пирамидально-призматических бункеров для сыпучих материалов // Вісник ДонДАБА: Композиційні матеріали для будівництва. — Макіївка: ДонДАБА. — 2001. — Випуск 2001-1(26). — С. 116-121.
14. Криворожский государственный горно-металлургический комбинат «Криворожсталь». Доменная печь №9. Бункерная эстакада. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций: Отчет о НИР, в 3 т. / ОАО проектный институт «Днепрпроектстальконструкция». — Днепр. — 1997.
15. Wichtowski B., Nazarko W. Service life of steel coke bin — non-destructive testing (NDT) // Proc. of 6th International Conf. «Modern Building Materials, Structures and Techniques». — Vilnius (Lithuania). — 1999. — P. 155-159.