



УДК 624.954

Банников Д.О. /д.т.н./

ДНУЖТ им. академика В. Лазаряна

Анализ причин аварий стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов

Приведены данные относительно аварийности стальных емкостных конструкций для хранения сыпучих веществ. Материалы включают как сведения, изложенные в специализированной литературе, результаты отчетов практических обследований конструкций и разбора причин их аварий, так и собственные авторские наработки, собранные по результатам проводимых исследований. Ил. 8. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: емкостная конструкция, сыпучий материал, отказ, авария

The data on the accident of steel structures for capacitive storage of bulk materials are presented. The data include both the information presented in the literature, reports results of practical investigations of structures and research of the reasons of their accidents, and personal author's groundworks collected on the results of the experiments held.

Keywords: capacitive construction, bulk material, failure, accident

Аварийность емкостных конструкций

Хотя современная концепция проектирования и создания стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, заложенная в разнообразные нормативные документы [1,2] и профессиональные издания [3], формировалась и уточнялась в течение многих десятилетий, однако практический опыт эксплуатации таких сооружений свидетельствует о ее несовершенстве. Емкостные конструкции на поверку оказываются недостаточно надежными и долговечными, о чем свидетельствует имеющаяся статистика их отказов и аварий.

Между тем, как справедливо отмечается в работе [3], силосы и бункера, как и все листовые конструкции, являются чрезвычайно ответственными сооружениями. Так «... из-за суточного простоя мощной доменной печи теряется около 3000 т чугуна, а крупной цементной печи - 1000 т цемента. Еще большими могут быть потери в результате разрушения смежных сооружений, вызванных нарушением сплошности данной листовой конструкции». Поэтому анализ основных проблем, приводящих к аварийности таких конструкций, является одной из важнейших задач на пути к повышению их качества.

Следует отметить, что в ряде случаев специализированная литература по данной тематике является достаточно скупой. Во многих работах приводятся лишь отрывочные данные и факты [4-7], при этом целостная картина данной проблемы отсутствует. Однако, это отнюдь не связано с высокой надежностью и долговечностью данного класса конструкций. Напротив, статистика аварий емкостей для сыпучих материалов является достаточно многоликой и разнообразной, но следует отметить, что определенные сложности с ее использованием все же имеют место. Дело в том, что силосы и, особенно, бункера достаточно часто являются неотъемлемым объектом таких производств, которые во многом носят стратегический ха-

рактер, а значит и все сведения о которых не подлежат широкой огласке. Нельзя сбрасывать со счетов и этическую сторону вопроса, когда полное разглашение всех подробных сведений об аварийных ситуациях подорвало бы авторитет соответствующих строительных и проектных организаций и нанесло бы им материальный ущерб.

Потому автор попытался довольно четко проанализировать общую картину аварийности емкостных сооружений, что и является **целью данной работы**. Затронутая тематика уже анализировалась автором в работе [9], однако в настоящей публикации она пересмотрена и дополнена рядом новых фактов.

Заметим, также, что к настоящему времени сложились несколько видов классификаций аварийности конструкций. Наиболее удачным из них являются классификации отказов и аварий либо по причинам их вызвавшим, либо по характеру повреждения и разрушения элементов. Однако, с точки зрения инженерной деятельности интерес, в первую очередь, представляют технические причины, предполагающие в дальнейшем потенциальное улучшающее вмешательство в конструктивную систему. Будем следовать данному принципу.

Отказы и аварии, обусловленные ошибками проектирования

Одна из основных специфических причин отказов и аварий стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов связана с неверным определением нагрузок на конструкцию. 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. Разработаны и используются в той или иной степени более двух десятков различных теоретических моделей, описывающих взаимодействие сыпучего материала с элемен-

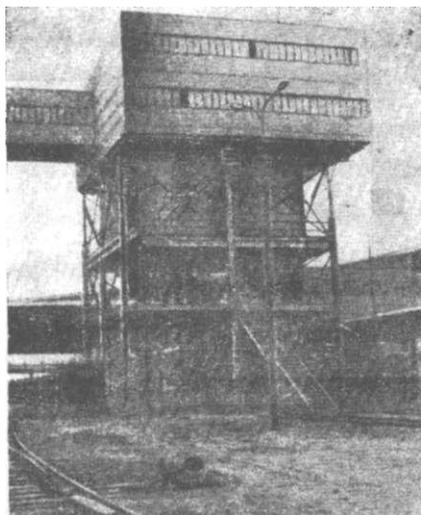
тами емкостной конструкции. При этом результаты, полученные по ним, отличаются как качественно различным распределением давлений, так и количественными значениями их максимальных значений, имеющими разбег до нескольких раз.

Кроме этого, при определении давления используются не фактические, а усредненные характеристики сыпучих материалов, приводимые в нормативно-справочной литературе. Причем по

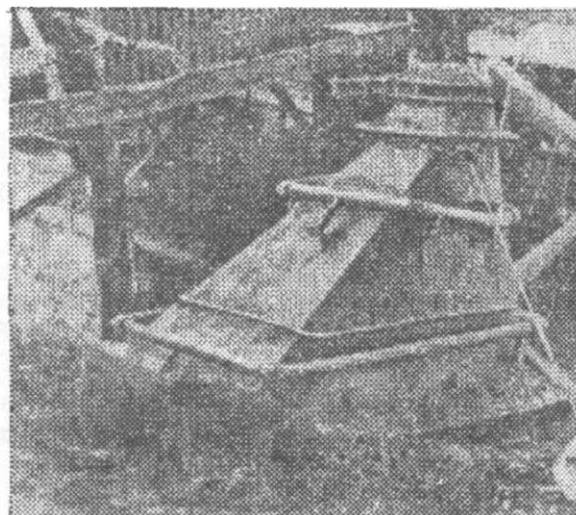
данным различных источников для одних и тех же материалов они также различны (отличие в удельном весе, например, может доходить до 50 %). Поэтому задача верного определения давления сыпучего материала на дно и стенки сосуда является одной из первостепеннейших и актуальнейших в проблеме рационализации конструкции бункеров и силосов. Так, в работе [4] приводится пример обрушения бункера объемом около 150 м³ для хранения цемента, случившееся 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 железнодорожный вагон (рис. 1). В качестве основной причины аварии как раз и указывается «...ошибочно принятая величина расчетной нагрузки...».

Точно такая же причина привела по данным работы [5] к аварии сварного цементного силоса объемом 1830 м³ на Магнитогорском цементном заводе. Во время выгрузки цемента из стального силоса в железнодорожные вагоны у силоса оторвалось коническое днище, и рухнувшим цементом были вызваны значительные разрушения конструкции самого силоса, кирпичных стен силосного отделения, воздушных и электрических сетей и железнодорожного состава, находящегося под погрузкой. При этом силос находился в эксплуатации всего два с половиной месяца.

На неверное определение давления от хранимого в силосах зерна указывается и при разборе причин целой серии аварий зернового элеватора [6]. Силосы были выполнены из железобетона, но это только лишний раз демонстрирует общность данной проблемы независимо от вида материала несущих элементов конструкции. На этих примерах довольно наглядно прослеживается и второй аспект указанной выше проблемы точного определения нагрузок, а именно - существенное заужение спектра учитываемых при проектировании нагрузок и воздействий. Значительная роль при этом отводится динамическим эффектам, сопровождающим эксплуатацию емкостных со-



а)



б)

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

ружении, в том числе и при использовании специальных устройств их принудительной разгрузки. На этом акцентируется внимание в работе [7].

В качестве второй специфической ошибки, допускаемой на стадии проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, можно выделить неверное назначение поперечных сечений несущих элементов. Как и предыдущая ошибка, она также имеет два аспекта.

Первый из них следует трактовать не как следствие предыдущей ошибки в назначении нагрузки (хотя связь между ними прямая и неоспоримая), а как результат применения упрощенной методики расчета, связанной с недостаточной изученностью и неверной трактовкой работы элементов емкостной конструкции. Так, в качестве второй основной причины уже упоминавшейся выше 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, известная автору из разговоров со специалистами. Достаточно уязвимой является и зона соединения ребер жесткости воронки между собой, быстро приходящая в негодность и потому постоянно требующая ремонта. На рис. 2 приведен пример повреждения этих элементов.

Вся сложность заключается в том, что официально применяемая в настоящее время инженерная методика проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов [1-3], впрочем, как и остальных видов листовых конструкций, 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 пространственных конструкций, которыми являются бункера и си-



Рис. 2. Отремонтированные несущие ребра жесткости бункеров

юсы. Еще одним примером, иллюстрирующим ошибочность такого подхода, является достаточно распространенная в Украине в последние годы ситуация с закупкой и эксплуатацией зарубежных стальных силосных емкостей большого диаметра (объем около 1000 м^3), выполненных по стандартному проекту. Проект не предусматривает нижней выпускной части конструкции, которую инженерам приходится допроектировать, что называется, по месту.

Такое проектирование выполняется в строгом соответствии с рекомендациями действующих нормативных документов и доминирующими представлениями о работе емкостных конструкций. В результате практически сразу после начала эксплуатации отмечаются погиби и погнутости элементов разгрузочных воронок - ребер жесткости и несущей стенки. Их величина может достигать до нескольких сантиметров, и они просматриваются невооруженным глазом (рис. 3).

В таких случаях зачастую выполняется дополнительное усиление воронок путем приварки системы удерживающих стальных тяжей из прокатных профилей. Они, в свою очередь, также рассчитываются в соответствии с принятыми в настоящее время представлениями о работе бункерных разгрузочных устройств под нагрузкой. Однако и они через некоторое время оказываются погнутыми и требуют дополнительного ремонта и усиления (рис. 4).

Интересно отметить также еще один любопытный момент. Согласно норм [1,2], нагрузки от сыпучего материала для таких конструкций следует определять как для бункерных емкостей. Однако, согласно зарубежной документации такие конструкции рассчитывались как силосы. При этом величина давления, принимаемая по иной теории, оказывается ниже приблизительно в 2,5 раза.

Второй аспект ошибки типа неверного назначения сечений конструктивных элементов стальных

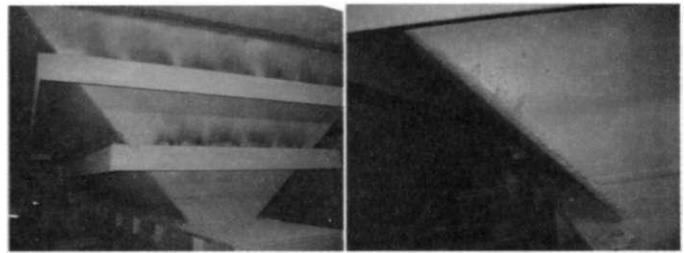


Рис. 3. Погнутости несущих элементов разгрузочной воронки емкостной конструкции

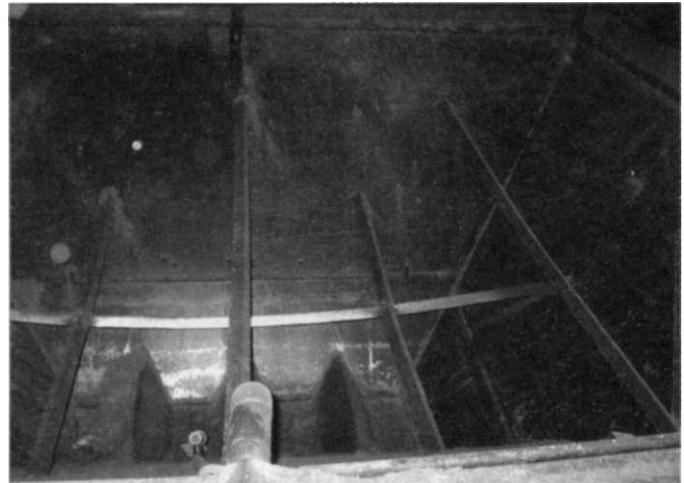


Рис. 4. Погнутости усиливающих стальных тяжей разгрузочной воронки емкостной конструкции

емкостей связан с довольно типовой в проектной практике ситуацией «чрезмерное расширение сферы применения». Так, по данным работы [6] в одном из совхозов произошло обрушение стального бункера-накопителя объемом около 650 м^3 , входящего в состав зерноочистительного комбината и эксплуатировавшегося до этого всего 12 дней (рис. 5). 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 получили значительные искривления с изгибом на 180° , но без разрыва стали.

Проверочные расчеты конструкции самого бункера, выполненные по нормам проектирования, показали, что она обладает достаточной прочностью, но гибкость опорных стоек намного превышает допустимую. Именно в этом и заключалась основная причина аварии. Бункер-накопитель 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.

Другим интересным примером на данную тему является бункерная эстакада доменного цеха одного из металлургических комбинатов. По результатам ее технического обследования техническое состояние 30 % бункерных емкостей было признано неудовлетворительным, поскольку их элементы находились в ограниченно работоспособном состоянии, техническое состояние остальных бункеров было признано крайне неудовлетворительным - их элементы находились в аварийном состоянии.

Все бункеры пирамидально-призматического

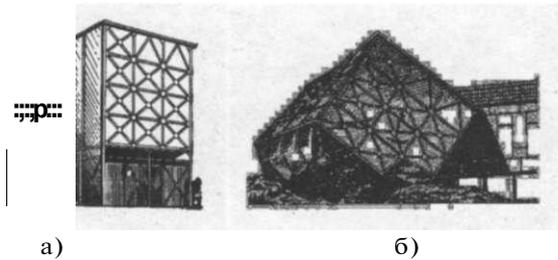


Рис. 5. Бункер-накопитель до (а) и после (б) обрушения

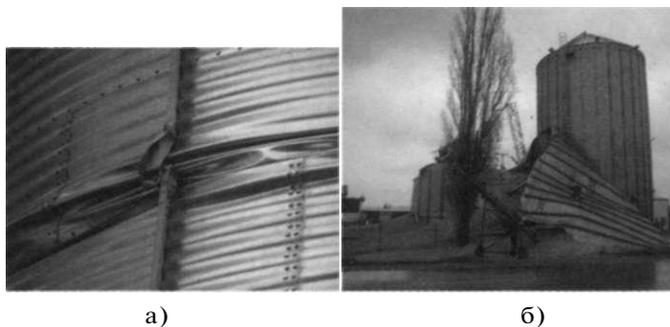


Рис. 6. Повреждение узла вертикальной стойки (а), приведшее к обрушению силоса (б)

типа объемом свыше 1000 м^3 были выполнены по единой конструктивной схеме с седловидной рамой по центру. В числе отмеченных дефектов фигурировали 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 потому, что, как оказалось, рассчитанные по все той же официальной методике бункеры в данном случае обладали значительным запасом прочности, а благодаря вовремя замеченным неисправностям интенсивность их эксплуатации резко снизили.

Отказы и аварии, обусловленные ошибками изготовления

Основной ошибкой изготовления стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов является отступление от проекта и выполнение ряда узлов либо элементов конструкции не по проекту. Так, на рис. 6а приведено повреждение узла стыковки вертикальных подкрепляющих стоек в силосе для зерна объемом 400 м^3 . Оно возникло вследствие ошибочно измененного сечения стойки по высоте [9]. В результате данная зона конструкции оказалась ослабленной настолько, что вся оболочка потеряла местную устойчивость. При последующей загрузке конструкции силоса произошла авария с полным разрушением сооружения (рис. 6б).

Второй ошибкой данной группы является некачественная подгонка элементов конструкции друг к другу, в результате чего образуются нестыковки отдельных конструктивов. Ситуация усугубляется тем, что емкостные сооружения в своем большинстве имеют значительные размеры, поэтому принятые в отечественной практике, казалось бы, незначительные допуски и отклонения при этом выливаются в довольно существенные погрешности, нарушающие схему работы конструкции. На рис. 7 приведены силосы объемом около 5000 м^3 , в которых из-за чрезмерно боль-



Рис. 7. Выгиб крыши силоса

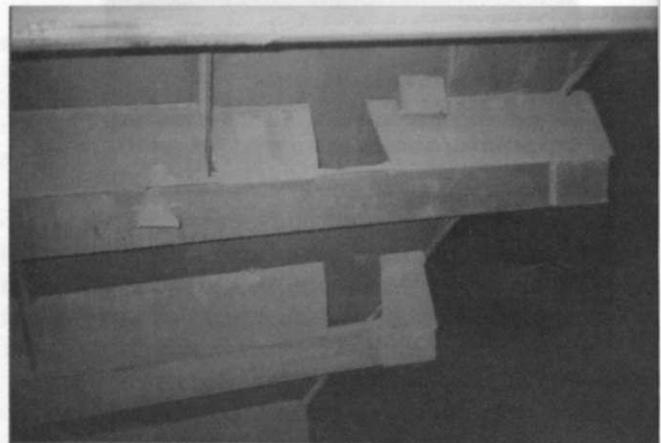


Рис. 8. Коррозионное повреждение стенок бункера

ших зазоров в узлах соединения основного корпуса и крыши последняя при приложении ветровой нагрузки провалилась внутрь.

Отказы и аварии, обусловленные ошибкам эксплуатации

В большинстве случаев ошибки эксплуатации стальных силосов и бункеров не приводят к возникновению серьезных аварийных ситуаций при своевременном их выявлении и принятии соответствующих мер. Однако отсутствие постоянного технического осмотра емкостных сооружений во время эксплуатации вполне может приводить к негативным последствиям, поскольку такие сооружения относятся к конструкциям с повышенной изнашиваемостью элементов.

Основным из таких элементов является футеровка стенок конструкции. Как показывает практика, ее износ может

сразу приводит к износу стенок конструкции, снижению их толщины и, соответственно, несущей способности. По данным обследований емкостей для кокса, представленных в работе [10], коррозионный износ стенок составил почти 30 % толщины стенки конструкции за 50 лет эксплуатации в условиях промышленного предприятия Польши.

Другой серьезной проблемой является коррозионный износ стальных емкостных сооружений. Такие повреждения считаются наиболее распростра-

ненным дефектом значительного большинства металлоконструкций, однако в отношении стальных емкостей данный вопрос является особенно острым. Во-первых, такие конструкции работают нередко в исключительно агрессивной среде - бункеры для кокса, агломерата, емкости для солей. Скорость коррозии незащищенных участков стали в этом случае может составлять до 0,5 мм/год. Во-вторых, выполнить качественное антикоррозионное покрытие оребренных емкостных конструкций со множеством выступов, углублений и труднодоступных мест оказывается довольно проблематичным (рис. 8). Поэтому довольно часто в практике эксплуатации данному вопросу не уделяется должного внимания и тогда коррозионный износ может достигать 60-80 %.

Третьей ошибкой, зачастую допускаемой при эксплуатации стальных емкостных конструкций, является загрузка сыпучего материала в сооружение без специальных загрузочных устройств. Дело в том, что емкостные конструкции во многих случаях имеют значительную высоту. Поэтому в случае, если емкость оказывается частично заполненной хранимым материалом, то вновь загружаемый материал падает с определенной высоты, создавая динамические воздействия и вибрации. Это усугубляет эффект от перечисленных ранее причин аварийности емкостных конструкций первых двух групп.

Выводы

Таким образом, можно выделить три основные группы специфических для стальных емкостных конструкций причин отказов и аварий. Указать при этом какую-либо доминирующую причину оказывается достаточно сложно, поскольку все они довольно распространены в практике проектирования и эксплуатации. В количественном отношении на основе приведенных выше данных приблизительное статистическое распределение этих причин составляет, %:

- некорректное определение нагрузок - 30;
- неверное назначение размеров несущих элементов - 40;
- ошибки изготовления - 10;
- ошибки эксплуатации - 20.

По мнению автора, такая картина достаточно

адекватно отображает общую ситуацию, которая имеет место в настоящее время в сфере проектирования и эксплуатации стальных вертикальных емкостных конструкций для сыпучих материалов.

Библиографический список

1. Сооружения промышленных предприятий: СНиП 2.09.03-85. - [Чинний від 1987-01.01]. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. - 56 с.
2. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна: ДБН В.2.2-8-98. - [Чинний від 1998-01-07]. - К.: Держбуд України, 1988. - 41 с.
3. Лессиг Е.И. Листовые металлические конструкции / Е.И. Лессиг, А.Ф. Лилеев, А.Г. Соколов. - М.: Стройиздат, 1970. - 488 с.
4. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский.; пер. с польского. - М: Стройиздат, 1978.- 183 с.
5. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. - М.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1968. - 208 с.
6. Шкинев А.Н. Аварии в строительстве. - М.: Стройиздат, 1984. - 320 с.
7. Классификация причин отказов стальных конструкций производственных зданий и сооружений / И.И. Крылов, Ю.П. Шевцов // Изв. вузов: сер. Строительство и архитектура. - 1983. - № 11. - С. 16-19.
8. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов / Д.О. Банников, М.И. Казакевич // Металеві конструкції. - 2002. - Т. 5. - № 1.-С. 59-66.
9. Дослідження причин появи пошкоджень будівельного об'єкту - силосу для оперативного зберігання зерна на 442 тонни, який розташований на території елеватору в с. Піщане: Звіт про НДР. - К.: ВАТ «Укрндіпроектстальконструкція» ім. В.М. Шимановського, 2009. - 34 с.
10. Wichtowski B. Service life of steel coke bin - non-destructive testing (NDT) / B. Wichtowski, W. Nazarko // Proc. of 6* Int. Conf. «Modern Building Materials, Structures and Tchniques» - Vilnius. - 1999.-P. 155-159.

Поступила 05.07.2011