



Особенности процесса разгрузки бункерных емкостей

Выполненные экспериментальные исследования на двух стальных емкостных конструкциях при различных видах загружаемого сыпучего материала позволили получить качественные и количественные параметры процесса разгрузки.

Был установлен ряд особенностей данного процесса, которые могут быть предсказаны теоретически и являются, по всей видимости, ключевыми характеристиками режима разгрузки емкостных конструкций. Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.

емкостная конструкция, сыпучий материал, процесс разгрузки

Бункерные емкостные конструкции

В современной металлургической и горнорудной отраслях промышленности бункерные емкости являются неотъемлемым элементом множества технологических процессов, связанных с переработкой

© Банников Д.О., 2008 г.

огромного количества различных сыпучих материалов. Такие сооружения располагаются как на территории добывающих и перерабатывающих предприятий, участвуя в производстве разнообразных видов продукции, так и на автомобильных и железнодорожных узлах, обеспечивая транспортировку сыпучих грузов.

Основной функцией бункерных емкостей в любой производственно-технологической цепочке является хранение сыпучего материала. Как правило, его загрузка осуществляется через верхнее загрузочное устройство с помощью специальных механизмов. Выгрузка же предполагается самоточечной, для чего нижней части конструкции бункеров придают специальную суживающуюся форму. При этом скорость и качество выгрузки часто оказываются одними из определяющих параметров, влияющих как на общий характер рабочего процесса, так и на требуемое количество емкостных конструкций в целом.

Ввиду достаточно сложных условий эксплуатации и многообразия воздействующих факторов бункера являются довольно быстроизнашивающимися конструкциями, подверженные отказам и авариям. Их статистика, приведенная автором в работах [1-2], свидетельствует о необходимости специального изучения поведения конструкций такого типа в условиях их реальной работы. К этому же склоняются и специалисты по проектированию и обслуживанию бункерных емкостей и ведущие ученые в данном направлении [3].

По данным ряда проводившихся наблюдений наиболее опасным режимом работы бункерных емкостей независимо от материала, из которого они изготовлены, является режим разгрузки. В работе [4, с. 4] приводится достаточно точное описание сложившейся ситуации в отношении емкостей зернового типа: «Требуется настоятельного решения проблема снижения повышенных радиальных нагрузок на стенки хранилищ. Такие нагрузки возникают из-за динамического давления зерна, которое при истечении превышает статическое более чем в 2-3 раза. Обследование проводили Промзернопроект, Гипроинисельстрой и другие организации. Было отмечено, что разрушения стенок (трещины, выпучивания, обрушения) происходят в режиме истечения».

Нельзя сказать, что указанной проблеме не уделялось внимание среди специалистов-теоретиков по механике сыпучей среды. Так известны работы [5, 6], ставшие уже в некоторых аспектах классическими. Однако, до конца разрешить указанную проблему, как отмечают сами авторы, пока не удастся.

Поэтому в практике проектирования прибегают к использованию эмпирических поправочных коэффициентов. Именно в таком виде вопросы учета повышенного динамического давления в режиме разгрузки емкостей фигурирует в отечественной нормативной [7] и специальной зарубежной литературе [8]. Тем не менее, разброс значений вводимых коэффициентов оказывается настолько велик, что говорить о единстве мнений пока еще достаточно рано.

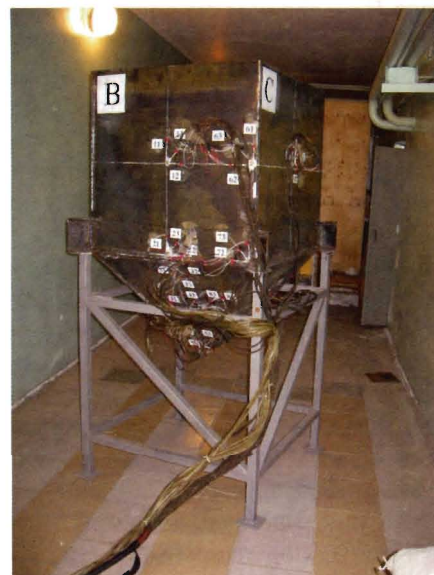


Рис. 1. Общий вид экспериментальной емкости № 1



Рис. 2. Общий вид экспериментальной емкости № 2



Рис. 3. Общий вид универсального тензометрического комплекса

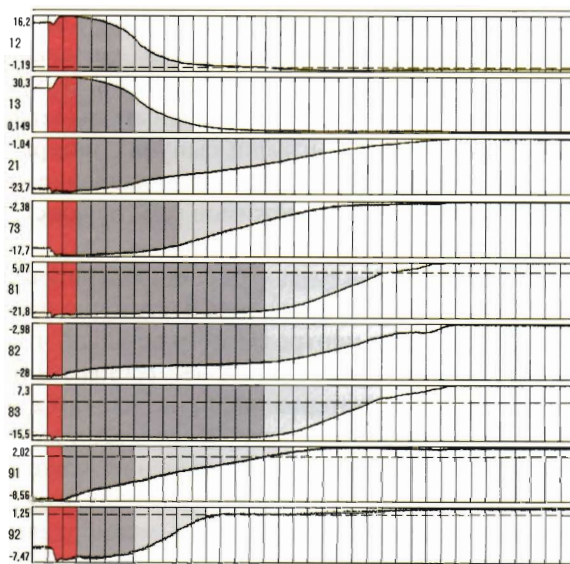


Рис. 4. Записи динамического процесса разгрузки емкостей

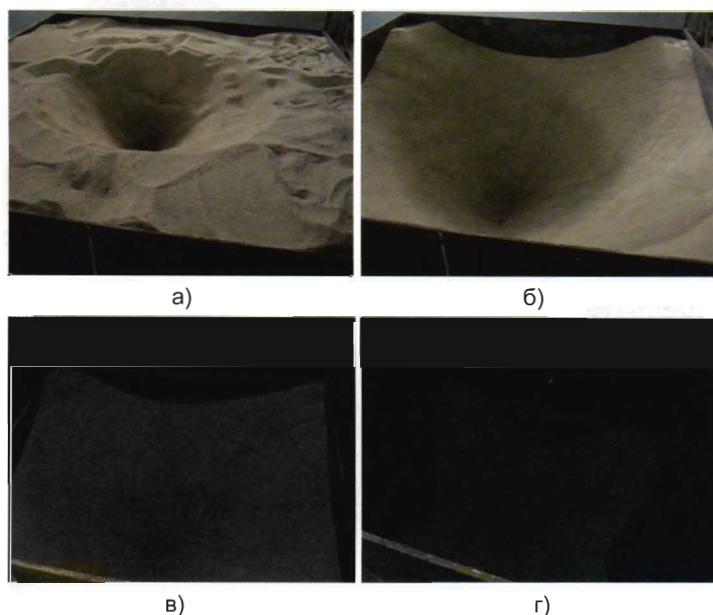


Рис. 5. Характер разгрузки песка в моменты времени: а) 3 с, б) 10 с, в) 30 с, г) 40 с

Таким образом, изучение режима разгрузки емкостных конструкций для сыпучих материалов является одной из важнейших задач, решение которой способствовало бы существенному повышению надежности и долговечности таких сооружений, а также привело бы к значительной экономии основных видов ресурсов.

Экспериментальное исследование процесса разгрузки

Эта задача была положена в основу проведенных автором экспериментальных исследований работы емкостных конструкций в различных режимах. Одним из них являлся именно режим разгрузки емкости.

Для проведения исследований были подготовлены две экспериментальные установки. Они представляли собой бункерные емкостные конструкции пирамидально-призматического типа, выполненные из стали Ст3. Размер вертикальной части в обоих случаях составлял $0,8 \times 0,8 \times 0,8$ м. Нижняя часть име-

ла форму усеченной пирамиды с углами наклона стенок к горизонту в 55° для первой емкости и 45° для второй емкости. Выпускное отверстие выполнялось квадратным с размерами $12,5 \times 12,5$ см. Конструкции через угловые элементы опирались на специальную опорную раму, обеспечивавшую необходимую высоту их расположения над полом для возможности полной выгрузки емкостей.

Для фиксации напряженно-деформированного состояния емкостей в процессе их работы на стенке в десяти зонах были наклеены розетки тензодатчиков. Через систему кабелей каждый из них подключался по стандартной мостовой схеме к универсальному измерительному комплексу ТМА-1, обеспечивавшему запись процессов непосредственно на компьютер. Общий вид экспериментальных установок приведен на рис. 1 и 2, а измерительного комплекса на рис. 3.

В качестве сыпучих материалов использовались три типа материалов – песок с крупностью частиц 0,25-1,5 мм, мраморная крошка с крупностью частиц 5-10 мм и щебень с крупностью частиц 10-20 мм. Все материалы были предварительно высушены, очищены и просеяны до требуемой фракции. Загрузка конструкций осуществлялась в ручном режиме с контролем ее равномерности. Разгрузка осуществлялась от момента полного заполнения емкостей вровень с обрезами верхней грани до момента их полного самотечного опорожнения. Никаких дополнительных побудительных разгрузочных устройств при этом не применялось.

В ходе экспериментальных исследований процесса разгрузки записывались динамические процессы по всем 30 установленным тензодатчикам (каналам). При этом выполнялась синхронизация по времени, а также велась видеозапись процесса истечения. Картины записанных процессов качественно оказались достаточно однотипны как для различных емкостей, так и для различных материалов, поэтому на рис. 4 представлены наиболее характерные из них, полученные для емкости 1 в случае загрузки мраморной крошки. Во всех записях в левой части указаны номера каналов (двухзначная цифра) и уровень зафиксированных напряжений в МПа (дробная цифра; знак «+» означает растяжение, знак «-» означает сжатие). Временная сетка нанесена с шагом 2 с. Фотографии, сделанные в различные моменты разгрузки из емкости № 1 для различных сыпучих материалов, представлены на рис. 5-7.

На рис. 4 каналы 12, 13 соответствуют центральной зоне верхней вертикальной части емкости, где наблюдается растяжение на внешней поверхности листа, канал 21 соответствует зоне стыковки верхней и нижней частей емкости в центральной части, оказывающейся сжатой. Аналогично, каналы 81-83 соответствуют угловой зоне верхней вертикальной части емкости, а канал 73 - угловой зоне в месте стыковки верхней и нижней частей емкости. В обоих случаях наблюдаются сжимающие напряжения, которые, однако, в процессе разгрузки меняют знак. Каналы

Таблица. Время разгрузки сыпучих материалов, с

№ п/п	Материал	Емкость	Теоретическое время, согласно [9]	Экспериментальное время
1	Песок	№ 1	33	46
		№ 2	37	38
2	Крошка	№ 1	61	71
		№ 2	69	56
3	Щебень	№ 1	61	93
		№ 2	69	72

91-92 соответствуют угловой зоне нижней воронкообразной части емкости, которая также оказывается сжатой. Отметим, что указанные особенности распределения напряжено-деформированного состояния в стальных емкостных конструкциях исследовались и описаны автором достаточно подробно в ряде его ранних работ.

Зафиксированные особенности процесса разгрузки

В ходе анализа полученных динамических записей процесса разгрузки (см. рис. 4) было установлено, что данный процесс протекает в 3 стадии.

На первой стадии, длящейся первые 1-3 с с момента начала разгрузки наблюдается резкое скачкообразное повышение давления. При этом оно превышало теоретическое в 1,68 раз для песка, 1,54 раза для мраморной крошки и 1,35 раза для щебня. Эти величины достаточно точно согласуются с теоретическими данными, полученными автором в ряде его предыдущих исследований. Указанная стадия выделена на рис. 4 красным цветом.

Основной причиной такого повышения давления сыпучего материала, по мнению автора, является изменение структурной схемы взаимного расположения его зерен в момент начала разгрузки, ведущее к изменению сил трения между соседними зернами. В свою очередь это приводит к скачкообразному повышению значения коэффициента бокового давления материала на стенки емкостной конструкции. Данное предположение, положенное в качестве гипотезы в авторскую теоретическую модель нашло достаточно отчетливое подтверждение в ходе проведенных экспериментальных исследований.

Второй этап процесса разгрузки характеризуется постепенным снижением величины давления. Его продолжительность колеблется в пределах 10-50 % всего времени разгрузки в зависимости от сыпучего материала, а точнее размера его зерен. На рис. 4 данная стадия выделена темно-серым цветом.

Для третьего этапа разгрузки характерно более интенсивное падение бокового давления вплоть до нуля, обусловленное значительным опорожнением конструкций. На рис. 4 данная стадия выделена светло-серым цветом.

В процессе разгрузки ни в одной из областей

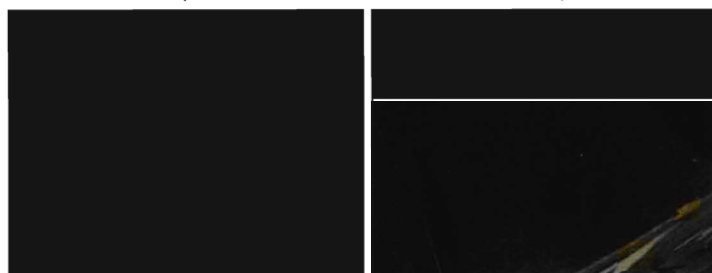
конструкции (ни по одному из каналов) не было зафиксировано повторное увеличение давления против полученного на первом этапе разгрузки. Это позволяет утверждать, что наиболее опасным является именно момент начала выгрузки сыпучих материалов из емкости, а возникающее при этом давление является наибольшим для всех режимов работы конструкций, включая и статический.

Во всех трех случаях различных сыпучих материалов разгрузка происходила достаточно однотипно с образованием в центре емкости воронки, что достаточно хорошо согласуется с качественным описанием форм истечения материалов, приведенным в работах [4-6]. Однако, предсказывавшееся в этих же работах появление пульсаций при истечении крупнозернистых материалов, коими в проведенных экспериментальных исследованиях являлись мраморная крошка и щебень, зафиксировано не было. Это требует внесе-



а)

б)



в)

г)

Рис. 6. Характер разгрузки мраморной крошки в моменты времени: а) 3 с, б) 10 с, в) 30 с, г) 50 с



а)

б)



в)

г)

Рис. 7. Характер разгрузки щебня в моменты времени: а) 3 с, б) 10 с, в) 30 с, г) 60 с

ния ряда уточнений в указанные авторские модели и, возможно, их корректировки.

Качественный характер разгрузки различных сыпучих материалов достаточно подробно проиллюстрирован на рис. 5-7. Из них в частности следует, что с уменьшением размера зерна материала скорость и интенсивность выгрузки возрастают. Причем такая закономерность имеет место и для крупнозернистых материалов. Вместе с тем, согласно работе [6] продолжительность истечения для них не зависит от размера их зерна, что не согласуется с выполненными измерениями. В таблице представлено сопоставление времени истечения для различных случаев проводившегося эксперимента с теоретическими данными, рассчитанными согласно указаниям работы [6].

Как видно из таблицы, в ходе эксперимента была зафиксирована тенденция, противоположная теоретической. Большему углу наклона граней выпускной части емкости соответствовало большее время разгрузки емкости (объемы емкостей отличались приблизительно на 10 %).

Выводы

Проведенные автором экспериментальные исследования процесса разгрузки сыпучих материалов из емкостных конструкций позволяют констатировать следующее:

1. Процесс разгрузки происходит в три стадии, из которых наибольшие давления сыпучего материала, оказываемые им на стенки емкости, имеют место на первой стадии, соответствующей первым секундам после начала процесса.

2. Количественно давления сыпучего материала на первой стадии превосходят статические давления на величину до двух раз для условий проведения эксперимента.

3. Выявлено достаточно точное совпадение теоретического повышения давления на первой стадии разгрузки с экспериментальными значениями. Из чего возможно предположить справедливость авторской модели поведения сыпучей среды в момент начала разгрузки.

4. В ходе экспериментальных исследований не

выявлено пульсаций давлений в ходе разгрузки, а также какого либо его повышения на последующих стадиях разгрузки.

5. Выявлена четкая взаимосвязь продолжительности разгрузки сыпучего материала из емкости в зависимости от размеров его зерна даже для крупнозернистых материалов.

По мнению автора исследований, полученные экспериментальные данные могут быть использованы для разработки и создания уточненной теоретической модели процесса динамической разгрузки сыпучей среды.

Библиографический список

1. Банников Д.О., Казакевич М.И. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов // *Металеві конструкції*. - 2002. - Т. 5. - № 1. - С. 59-66.
2. Bannikov D.O., Kazakevitch M.I. Features of Failures of Steel Bunkers (of pyramidally-prismatic type) // *Proc. of 10th Polish-Ukrainian sem. «Theoretical Foundations of Civil Engineering»*. - Warsaw: Warszawskiej Politechnik. - 2002. - Vol. II. - P. 650-657.
3. Ягофаров Х., Собакин Н.Н. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер. - Екатеринбург: УрГУПС, 2006. - 234 с.
4. Семенов В.Ф. Бункеры и хранилища зерна. - Барнаул: изд-во АлтГТУ, 1999. - 221 с.
5. Богомягих В.А. Теория и расчет бункеров для сыпучих материалов. - Ростов-на-Дону: изд-во РГУ, 1974. - 149 с.
6. Гячев Л.В. Основы теории бункеров. - Новосибирск: изд-во НГУ, 1992. - 312 с.
7. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна. - Введ. 01.07.98. - Вид. офіц. - К.: Держбуд України, 1988. - 41 с.
8. *Structural Engineering Handbook* / Edited by Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer. - 4th ed. - McGraw-Hill, 1997. - 624 p.