

УДК 624.954

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ
ПИРАМИДАЛЬНО-ПРИЗМАТИЧЕСКИХ БУНКЕРОВ**

Асп. Банников Д.О.

*Днепропетровский государственный технический университет
железнодорожного транспорта*

Технологический процесс во многих отраслях хозяйства предусматривает хранение и переработку сыпучих материалов с использованием различных емкостей. Среди них наибольшее распространение получили стальные бункера, как наиболее индустриальные. Пирамидально-призматический бункер в силу своей простоты и доступности используется чаще других типов стальных бункеров. В то же время, это одна из немногих строительных конструкций, работа которой специально не изучалась, вследствие чего пирамидально-призматические бункера являются в настоящее время одними из наиболее металлоемких конструкций.

Традиционный метод расчета и конструирования бункеров основан на условном членении конструкции на отдельные простые элементы, с последующим расчетом каждого из них по элементарным плоским расчетным схемам [1]. В результате теряется исключительно важный фактор пространственности работы системы. Как показано в работе [2], это ведет к неучету многих местных концентраторов напряжений с одной стороны, и неоправданному перерасходу материала там, где физически этого не требуется, с другой стороны.

В качестве одного из решений данной проблемы автором предложено использовать для проектирования стальных пирамидально-призматических бункеров хорошо зарекомендовавший себя в последние годы метод конечных элементов (МКЭ). Ряд полученных результатов представляет значительный научный интерес и опубликован в специальных изданиях (см., например, [2]). Показано, также, что КЭ-подход к проектированию такого типа бункеров в настоящее время является единственной методикой, позволяющей создавать надежные и в то же время экономичные конструкции. Однако, применение МКЭ для моделирования работы пирамидально-призматических бункеров имеет ряд существенных особенностей, которые обязательно должны быть приняты во внимание при разработке расчетных схем и проведении расчетов. Все предложенные ниже рекомендации были выработаны автором в процессе отладки и уточнения КЭ расчетных схем при сопоставлении результатов физических и численных экспериментов.

Прежде всего были использованы результаты обследования конструкций и узлов гигантской бункерной эстакады комбината «Криворожсталь». Запро-

ектированные в начале 70-х гг. все ее элементы находились до настоящего времени в непрерывной эксплуатации. Капитальный ремонт не проводился. Это, а также ряд более существенных факторов привели к тому, что по данным отчета [3] техническое состояние более половины бункеров было определено как «аварийное», что означает наличие нарушений требований по предельным состояниям I группы.

Результаты КЭ-имитации всех обнаруженных дефектов и повреждений, а также сравнение полученных результатов с натурными данными освещены в работе [4]. Здесь отметим лишь, что полученное качественное и, до некоторой степени, количественное совпадение картин напряженно-деформированного состояния (НДС) свидетельствует в пользу возможности использования МКЭ для моделирования данного класса бункеров.

Наиболее тщательная отработка параметров КЭ и методики проведения расчетов была проведена на КЭ-модели испытанной в «Днепрпроектстальконструкции» оребренной стенки бункера [5]. Реально были испытаны три конструктивно идентичные стенки, отличающиеся шагом ребер и, как следствие, - гибкостями. Однако, для КЭ-моделирования была выбрана только одна из них, шедшая в экспериментах под №3, поскольку остальные две стенки были выполнены не совсем геометрически идеально (следствие сварки тонких листов), что вызвало появление пластических деформаций в ряде зон еще при предварительной обкатке и привело к прохлопыванию обшивки во время испытаний.

Конструктивная схема стенки приведена на рис. 1а. Она состоит из рабочего отсека, представляющего собой стальную пластину (сталь Ст3) толщиной 2мм, размерами 1×1м, подкрепленную системой односторонних горизонтальных ребер, не привариваемых к панели, и моделирующих шарнирно-подвижное опирание. Верхний и нижний пояса выполнены из полосы сечением 90×3мм. К рабочему отсеку с боков примыкают дополнительные отсеки, предназначенные для жесткого закрепления всей конструкции в специальном испытательном стенде. Они разделены на участки прорезями для уменьшения изгибной жесткости в своей плоскости и исключения участия в восприятии изгибающих моментов. Нагружение модели представляло собой равномерно распределенное поперечное давление, направленное нормально к поверхности стенки, интенсивностью $0,1 \text{ кг/см}^2$. Физически оно осуществлялось подачей воздуха в специальные резино-тканевые подушки, закрепленные по всей плоскости рабочего отсека.

В процессе испытаний в четырех сечениях рабочего пролета (П1-П4) в уровнях 1-5 (см. рис. 1а) измерялись следующие величины: линейные деформации в горизонтальном, вертикальном и наклонном направлениях; прогибы (только для сечений П3-П4).

Численный эксперимент проводился на базе программного комплекса SCAD. Конструктивная схема, условия опирания и нагрузка были смоделированы в полном соответствии с реальной системой. Для сокращения времени счета просчитывалась половина панели (см. рис. 1б) с заданием условий симметрии деформаций по краю.

В ходе вычислений была установлена необходимость обязательного учета геометрической нелинейности работы обшивки, т.к. иначе результаты получаются завышенными в 1,2-1,5раза. Наиболее устойчивые результаты давала сетка КЭ на базе 4-угольного изопараметрического оболочечного моментного КЭ. При этом в районе опорного ребра и зон соединения обшивки с ребрами жесткости необходимо проводить сгущение сетки. Размер КЭ здесь должен находиться в пределах 1/10-1/15 характерного размера (шага ребер). В центральной же части он может быть увеличен до 1/5-1/4 характерного размера. Дальнейшее сгущение сетки очень мало повышает точность результатов (на 3-5%).

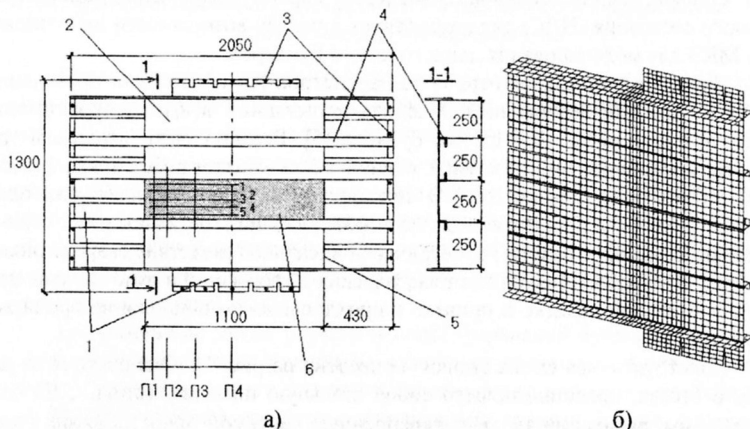


Рис. 1. Конструктивная (а) и расчетная (б) схемы оребренной стенки:

1 - дополнительные отсеки; 2 - рабочий отсек; 3 - места закрепления в стенде; 4 - ребра жесткости; 5 - опорное ребро; 6 - рабочий пролет

Сравнение результатов натурального и численного экспериментов представлено в таблице 1 (колонки 2-5). Приведены данные только для сечения ПЗ (в остальных сечениях картина аналогична) и для главных напряжений (по нормальным напряжениям картина аналогична). Видно, что результаты совпадают только качественно. Это объясняется наличием начальной погиби испытанной панели от некачественной приварки ребер. Их характер и величина (максимальное отклонение – 5мм) были зафиксированы только для рабочего пролета и только в сечениях П1-П4 (рис.2). Из-за отсутствия данных об уровне и характере подобных начальных несовершенств по всей поверхности обшивки модели в расчетную схему дополнительно были заложены только имеющиеся. Из таблицы 1 (колонки 4-7) видно, что даже это привело к видимому количественному изменению общего НДС состояния системы (заметьте, что уровень напряжений и деформаций все-таки невелик), из чего наглядно свидетельствует потенциальная опасность такого рода недоделок. Качественно же картина не изменилась.

Довольно высокий уровень различных начальных дефектов был отмечен при обследовании бункерной эстакады [3]. Таким образом, нормирование ровня и характера начальных несовершенств в стальных бункерах является одним из неотъемлемых условий проектирования и строительства надежных долговечных конструкций, и обязательно, по мнению автора, должно быть отражено в специализированных нормативных общегосударственных документах

Таблица 1.

Сравнение результатов физического и численного экспериментов
(напряжения в $\text{кг}/\text{см}^2$, прогибы в мм)

| Точка | Эксперимент | | МКЭ | | МКЭ с начальными несовершенствами | |
|-------|--------------------|--------|--------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| | главные напряжения | прогиб | главные напряжения | прогиб | главные напряжения | прогиб |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | -290 | 0,77 | -196 | 0,62 | -139 | 0,54 |
| | -532 | | -618 | | -423 | |
| 2 | 300 | 0,84 | 161 | 0,93 | 100 | 0,72 |
| | 231 | | 34 | | 23 | |
| 3 | 237 | 0,83 | 327 | 0,99 | 238 | 0,76 |
| | 189 | | 160 | | 124 | |
| 4 | 243 | 0,76 | 162 | 0,77 | 89 | 0,63 |
| | 171 | | 31 | | 3 | |
| 5 | -172 | 0,69 | -197 | 0,61 | -153 | 0,55 |
| | -296 | | -623 | | -509 | |

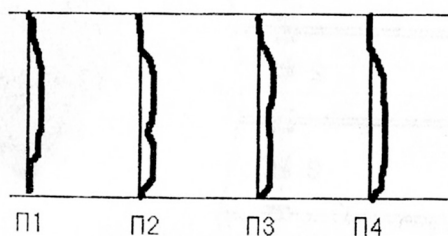


Рис. 2. Характер начальных погибей обшивки рабочего пролета стенки в сечениях П1-П4

Заключительным звеном при отладке расчетных КЭ-схем пирамидально-призматических бункеров явилось численное моделирование модели бункера, испытанной в Ленпроектстальконструкции. Целью испытаний была попытка экспериментального установления реального НДС такого типа бункера как пространственной системы.

Конструктивно модель представляла собой небольшой ($1,3 \times 1,3$ м поверху при общей высоте 1,25 м) симметричный в плане относительно обеих осей пирамидально-призматический бункер из оргстекла. Материал был выбран по

соображениям получения приемлемого для чувствительности испытательной аппаратуры уровня деформаций конструкции. Обшивка бункера выполнена из листов толщиной 5мм, элементы обвязки и ребра жесткости в виде пластин – 10мм. Соединение узлов осуществлялось спецсваркой. Опирался бункер в углах на стальные стойки $\varnothing 60$ мм. В качестве загрузки использовалась вода.

В ходе эксперимента измерялись деформации в ряде точек модели (рис.3а). Однако, схема наклейки датчиков была выбрана в предположении возникновения в ребрах жесткости и элементах балки обвязки одноосного НДС, хотя реально оно двухосное. Например, в месте соединения с ребром жесткости обшивка изгибается в антикластическую поверхность, и один горизонтальный датчик не позволяет судить об уровне напряжений в данной зоне. (Заметим, что данный факт был учтен при наклейке датчиков на оребренную стенку, описанную в п.2.2 и затем полностью подтвердился при численном моделировании). Таким образом, для дальнейшей обработки остались пригодны только 40% данных – точки 1-4 на рис.3а, где была наклеена розетка тензодатчиков. Прогибы были измерены очень неточно и для сравнения с результатами КЭ-моделирования также оказались непригодны.

Расчетная схема модели представлена на рис.3б. Она представляет собой четверть бункера. Первоначально ребра жесткости были смоделированы объемными элементами. Однако, в процессе исследований выяснилось, что моделирование пластинчатыми КЭ несколько не понижает точности вычислений.

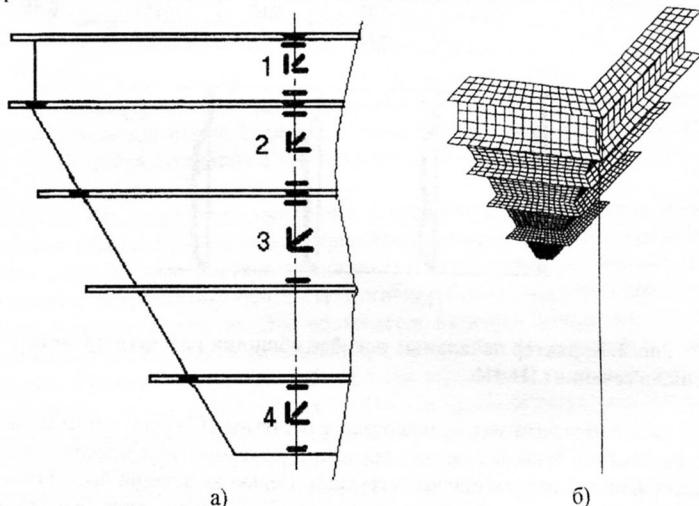


Рис. 3. Схема наклейки датчиков (а) и расчетная схема (б) модели бункера из оргстекла

Следует отметить также, что включенная в КЭ-модель опорная стойка не повлияла на изменение общего НДС модели. Полученные результаты идентичны варианту с постановкой вместо нее шарнирно-неподвижной опоры.

Сравнение результатов натурального и численного экспериментов приведено в таблице 2 (колонки 2-4). Представлены главные напряжения, поскольку в точках на оси симметрии они совпадают с нормальными. Видно, что погрешность в точках 2-4 невелика. В точке же 1 сами результаты сравнимы с точностью эксперимента. Поскольку оргстекло – пластический материал, то, как видно из диаграммы на рис.4, стабилизация деформаций происходит не сразу. В эксперименте граница стабилизации деформаций была принята по линии 1 (отсчеты снимались спустя 2-5мин), реально же она ограничена линией 2. Таким образом, эксперимент содержит систематическую ошибку. Для ее нейтрализации был посчитан конструктивный коэффициент и введена соответствующая поправка (колонки 5-6). При этом отмечено довольно хорошее совпадение результатов.

Таблица 2.

Сравнение результатов физического и численного экспериментов (напряжения в кг/см²)

| Точка | Напряжения | | Погрешность % | Экспериментальные напряжения с учетом конструктивного коэффициента 1,14 | Погрешность % |
|-------|-------------|------|---------------|---|---------------|
| | эксперимент | МКЭ | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0,8 | 0,6 | 25,0 | 0,9 | 33,3 |
| | -2,4 | -3,9 | 62,5 | -2,7 | 44,4 |
| 2 | 26,7 | 29,2 | 9,4 | 30,4 | 3,9 |
| | 9,4 | 11,3 | 20,2 | 10,7 | 5,6 |
| 3 | 41,6 | 49,0 | 17,8 | 47,4 | 3,4 |
| | 15,9 | 18,9 | 18,9 | 18,1 | 4,4 |
| 4 | 42,5 | 45,8 | 7,8 | 48,4 | 5,4 |
| | 37,7 | 43,7 | 15,9 | 43,0 | 1,6 |

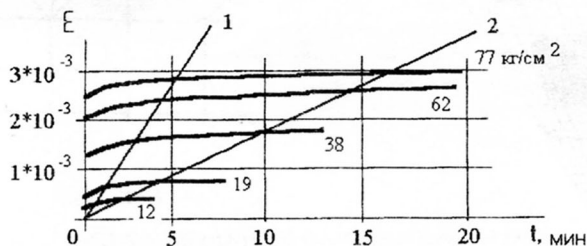


Рис. 4. Диаграмма стабилизации деформаций в оргстекле:

1-принятая в эксперименте граница стабилизации деформаций;

2-реальная граница стабилизации деформаций

Еще один немаловажный момент связан со способом разбивки моделей на КЭ. На рис. 5а для примера приведена схема распределения одного из из-

гибающих моментов. Для наглядности все зоны с положительными значениями момента не окрашены, с отрицательными – затемнены. Сетка выполнена таким образом, что количество КЭ по длине ребер по всей плоскости обшивки остается постоянным. Изменяется количество КЭ по высоте в каждом из пролетов между ребрами жесткости. Видна постепенная потеря точности решения по мере разряжения сетки снизу вверх – расплывается граница положительной и отрицательной зон. Однако, поскольку наибольшие напряжения имеют место в нижней части бункера (нижние 1-2 отсека), то они останутся без изменения, при условии верного выбора КЭ в этих зонах.

Такой тип разбивки приемлем для бункеров небольших размеров в плане (примерно до 6×6м). В более габаритных бункерах точность решения значительно падает уже во 2-3 снизу пролетах. В этом случае рекомендуется использовать более сложный принцип разбивки: количество КЭ по высоте пролета постоянно, но меняется по длине ребер. При таком подходе возникает несовпадение узлов в местах присоединения ребер жесткости. Поэтому, необходимо использовать сгущение сетки 1:3 по принципу, приведенному на рис. 5б. Не обязательно выполнять подобную перестыковку каждого пролета – достаточно проводить ее через 2-3 пролета. Данный вопрос должен решаться применительно к каждому конкретному случаю. В особо сомнительных или же ответственных ситуациях может быть использован известный прием сравнения точности получаемых результатов на исследуемой и более мелкой сетках, с постепенным достижением требуемой точности.

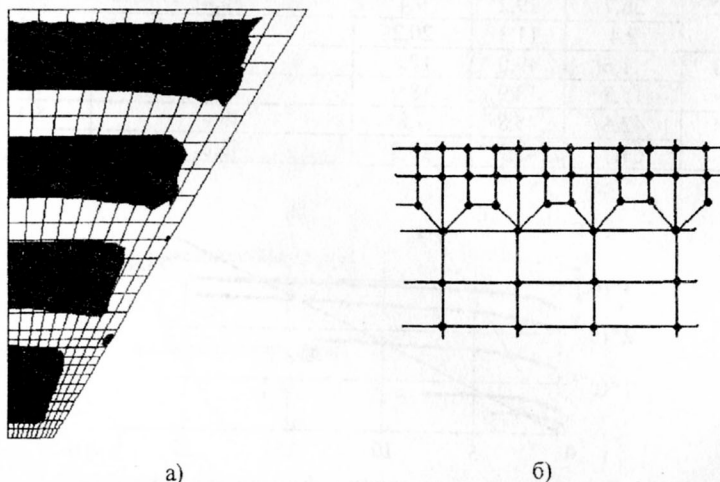


Рис. 5. Схема распределения изгибающего момента при I типе сетки КЭ в стенке бункера (а) и схема перестыковки II типа сетки в районе ребер (б)

Подытоживая все вышесказанное можно заключить, что МКЭ не только может, но и должен применяться для численного моделирования пирамидально-призматических бункеров на стадии их проектирования. Именно такой подход позволяет получить цельное, панорамное представление о работе конструкции как единой пространственной системы, комплексно увидеть все ее недостатки и положительные свойства. Именно МКЭ позволит выявить те прочностные ресурсы данного класса бункеров, которые так часто отмечают специалисты, проектировщиками, строителями, эксплуатационщиками, ремонтниками в различных монографиях, публикациях, отчетах, да и просто словесно. Однако, только корректное применение КЭ-подхода, использование ряда рекомендаций, в т.ч. и предложенных автором данной работы, является одним из основных условий создания надежных и экономичных бункеров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров /Ленпромстройпроект.-М.: Стройиздат, 1983.-200с.
2. Казакевич М.И., Кострица С.А., Банников Д.О. Напряженно-деформированное состояние стального пирамидально-призматического бункера // Вестник ДГАСА «Строительные конструкции. Здания и сооружения».-1998.- вып.98-4(12).-С.37-44.
3. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций: Отчет (тема 5469КМ) / ОАО проектный институт «Днепрпроектстальконструкция».-Днепропетровск, 1997.-237с.
4. Банников Д.О., Казакевич М.И. Оценка технического состояния стальных бункеров транспортной эстакады с применением МКЭ // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. –2000.-№59.-С.1-3.
5. Экспериментальное исследование стенок бункеров на моделях: Отчет о НИР (тема №9148-51-81) / Госуд. проектн. ин-т строит. металлоконструкций «Днепрпроектстальконструкция».-Днепропетровск, 1982.-413с.
6. Провести экспериментально-теоретические исследования прочности и жесткости стальных бункеров большой емкости: Отчет о НИР (тема 6931) / ЦНИИ Проектстальконструкция (Ленинградское отделение).-Л., 1971.-174с.

УДК 539.3

ФОРМУЛЮВАННЯ ВАРІАЦІЙНОГО ПРИНЦИПУ РЕЙСНЕРА ДЛЯ ФІЗИЧНО-НЕЛІНІЙНОГО ТІЛА

Зеленський А.Г., к.ф.-м.н., доцент

Варіаційні принципи мають важливе значення в теорії пружності і пластичності. За їх допомогою можна наближено розв'язувати достатньо складні