

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НЕУПРУГИХ СКЛАДЧАТЫХ СИСТЕМ

Левин В.М., *д.т.н., проф.*

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
Макеевка .Украина*

### 1. Введение

Расчётные схемы многих большепролётных конструкций покрытий и перекрытий, ряда железобетонных башенных сооружений промышленного назначения (башенные копры предприятий по добыче полезных ископаемых подземным способом, грануляционные башни предприятий по производству минеральных удобрений), ёмкостных сооружений (силосы с квадратным, прямоугольным или многоугольным сечением ячейки, лотковые и пирамидальные бункеры), сооружений смешанного типа (угольные башни коксохимзаводов), транспортных сооружений (коробчатые пролётные строения мостов и галерей, тоннели, лотки), гидротехнических сооружений (приливные электростанции, шлюзы) - складчатые системы, как правило, призматические, с открытым или замкнутым, иногда - многосвязным сечением (примеры таких сооружений показаны на рис. 1).

Указанные сооружения весьма ответственны, для них характерны высокая стоимость и трудоёмкость возведения, а ущерб (включая экологический) от их отказа может быть чрезвычайно большим.

Это обуславливает необходимость использования достаточно адекватных математических моделей процессов их деформирования и разрушения и достаточно точных методов анализа этих моделей.

В то же время условия, определяющие протекание этих процессов, в ряде случаев достаточно сложны и необычны. Вследствие этого они могут выходить за пределы области, рассматривавшейся разработчиками соответствующих норм, компьютерных программ, методов, имеющих рекомендаций и других опубликованных данных. В результате зачастую принимаются необоснованные проектные решения, обуславливающие либо недостаточную надёжность и долговечность, либо излишнюю стоимость, материал - и трудоёмкость объекта.

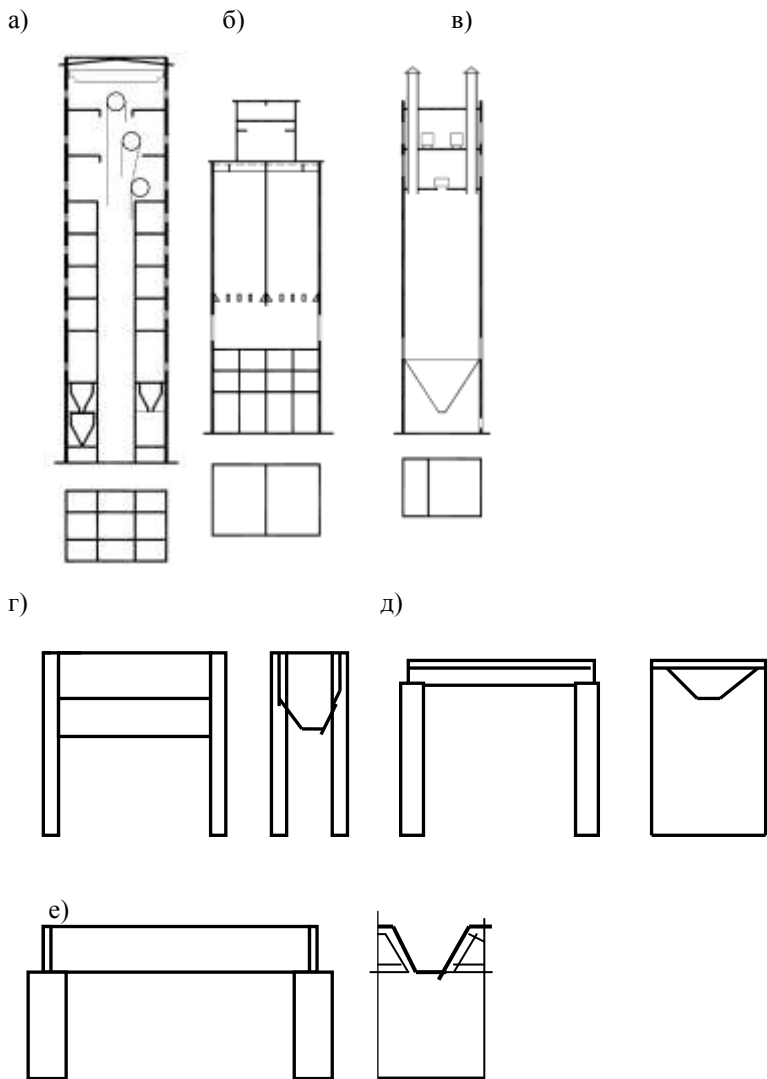


Рис.1. Примеры сооружений, расчётными схемами которых могут служить складчатые системы  
а) – башенный копёр; б) – угольная башня; в) – тушильная башня;  
г) – лотковый бункер; д)– пролётное строение; е)– складка покрытия  
(видны элементы решётчатой диафрагмы и опоры)

К таким условиям можно отнести, например, сложную геометрию (открытые или замкнутые, одно – или многосвязные сечения, наличие проёмов, скачков толщин и др.), наличие местных нагрузок, высокий уровень неупругих деформаций, старение бетона, изменение температуры и влажности; влияние процесса возведения на формирование напряжённо-деформированного состояния. Увеличение габаритов сооружения может усугубить влияние этих факторов.

Специфика складчатых систем обусловила создание специальной теории их расчёта и соответствующей группы методов (G. Ehlers, H. Craemer, E. Gruber, В.З. Власов, П.Л. Пастернак, J. Gaafar, H. Simpson, W. Tetzlaff, И.Е. Милейковский, К. Kloppel и F. Thiele, А.В. Александров, В.Я. Лашенников, Б.С. Васильков, Б.Е. Улицкий, И.Ф. Образцов, В.А. Баженов и В.Ф. Оробей, А.С. Городецкий, Э. Рауэ и В.И. Иокубайтис, Т.А. Балан и Н.И. Карпенко, С.Ф. Клованич и Г.Р. Бидный, В.И. Колчунов, Г.М. Кадисов и Н.В. Завьялова и др.)

Почти все указанные работы не предусматривают наличия проёмов, неоднородности материала, произвольных граничных условий, многих видов местных нагрузок, различных видов неупругих деформаций, технологии возведения.

Теоретически все эти особенности могут быть учтены при использовании метода конечных элементов, однако, соответствующие вопросы лежат за пределами теории складок и здесь не рассматриваются. Многие программные комплексы, реализующие МКЭ, такие возможности не предусматривают.

## **2. Постановка задачи, методы исследований**

Предлагается метод, алгоритм и пакет программ, предусматривающие общий случай неупругой призматической складчатой системы с многосвязным поперечным сечением, проемами и дефектами; толщины граней могут быть кусочно-постоянными вдоль продольного размера и контура складки (они ориентированы на башенные сооружения промышленного назначения [1], примеры - на рис. 1а, б, в).

Дискретизация области выполняется методом неполной дискретизации (МНД, модель Канторовича – Власова) в форме метода исходных уравнений И.Е. Милейковского [2].

Решение задачи длительного деформирования выполняется с использованием ядра релаксации А.С. Александровского, предложения Н.А. Арутюняна по учёту временной неоднородности бетона, методов конечных сумм и вырожденных ядер.

Для кратковременного догружения деформативные свойства бетона описываются вариантом деформационной теории пластичности бетона (В.М. Круглов, А.И. Козачевский) и теорией деформирования железобетона.

бетона с трещинами (Н.И. Карпенко), линеаризация выполняется шагово-итерационным методом фиктивных нагрузок Ильюшина

Линеаризованная задача в результате применения МНД

$$\frac{dX}{dz} = AX + P^f + P = \theta, \quad (1)$$

где  $X = X(z)$  - вектор обобщённых перемещений и усилий;  $z$  - продольная координата;  $A$  - матрица коэффициентов;  $P^f, P$  - вектора фиктивных и действительных нагрузок;  $\theta \in R^{2mn}$  - нуль - вектор,  $m, n$  - количество степеней свободы узла сечения и количество узлов в сечении, решается методом ортогональной прогонки Годунова.

### 3. Пример расчёта (рис. 2).

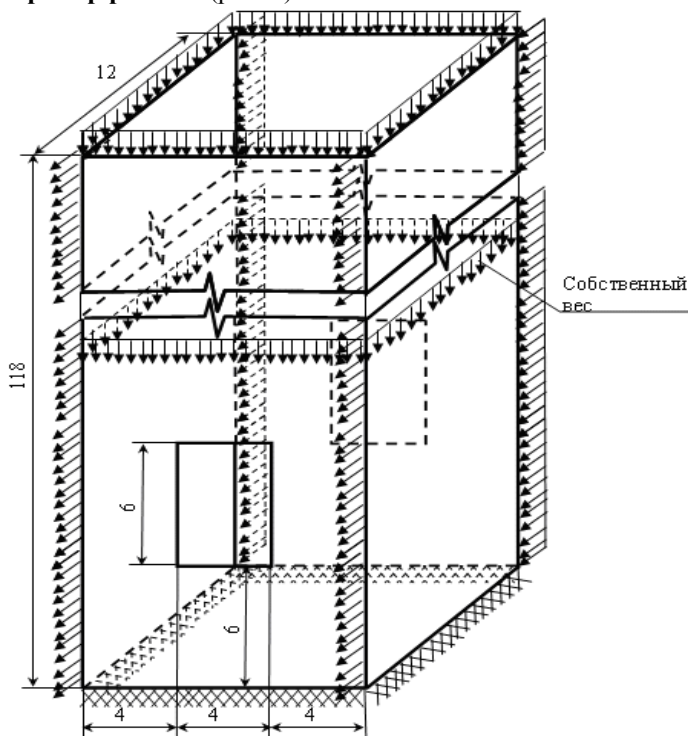


Рис. 2. Расчетная схема складки (к примеру расчёта)

Призматическая складка высотой 118,0м, сечения размерами 12,0x12,0 м, с двумя проёмами размерами 4,0x6,0 м (ВxН) м, модели-

рующая железобетонное башенное сооружение. На нижнем торце складка закреплена, на верхнем – свободна.

Бетон класса по прочности на сжатие В20, толщина стен 0,25 м, армирование выполнено отдельными стержнями из стали класса АШ, площадь сечения арматуры: вертикальной – 20, горизонтальной – 5 см<sup>2</sup>/м. Учитывались два этапа нагружения: первый –возрастающим в процессе возведения весом вышележащей части, второй – кратковременной ветровой нагрузкой (условно принята постоянной по высоте).

Результаты расчёта в виде эпюр нормальных напряжений в горизонтальном сечении складки поверху проёма (построены на развёртке сечения) представлены на рис. 3 (бетон) и рис. 4 (вертикальная арматура) при различных уровнях нагрузки второго этапа. На них видны участки концентрации напряжений, образования трещины (нулевых напряжений в бетоне), разрушения сжатого бетона, пластических деформаций в вертикальной арматуре.

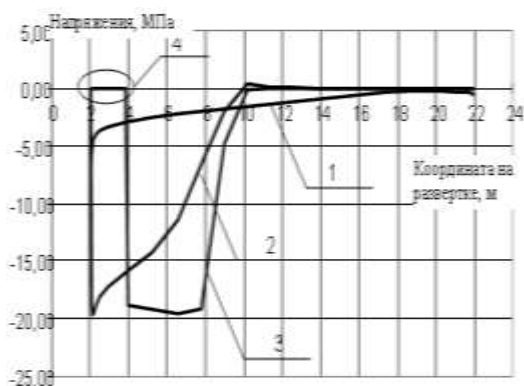


Рис. 3. Напряжения в бетоне

- 1 –  $M=82,6 \text{ МН*м}$ ; 2 –  $M=125,2 \text{ МН*м}$ ; 3 –  $M=142,3 \text{ МН*м}$ ;
- 4 – участок разрушения сжатого бетона в процессе прогрессирующего разрушения

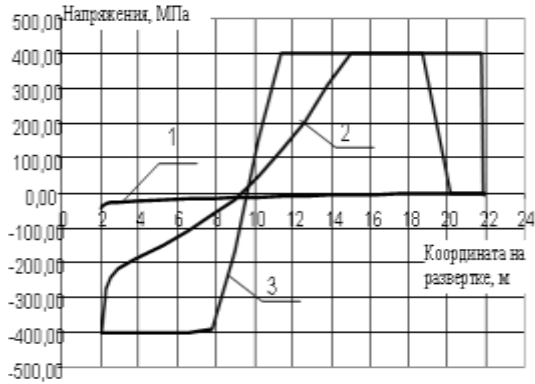


Рис. 4. Напряжения в вертикальной арматуре  
 1 –  $M=82,6 \text{ МН*м}$ ; 2 –  $M=125,2 \text{ МН*м}$ ; 3–  $M=142,3 \text{ МН*м}$

На рис.5 показаны границы областей разрушения сжатого бетона и разрыва растянутой вертикальной арматуры при различных значениях изгибающего момента от горизонтальных нагрузок в процессе прогрессирующего разрушения сечения.

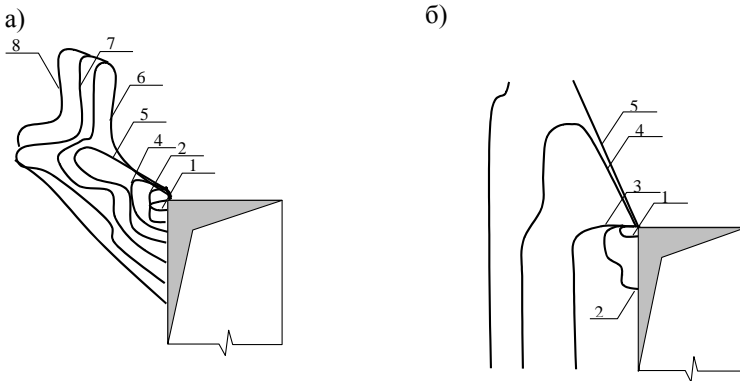


Рис. 5. Границы зон разрушения материалов: а –бетона сжатой грани; б – вертикальной арматуры растянутой грани  
 1–  $M=146,8 \text{ МН*м}$ ; 2 –  $M=171,3 \text{ МН*м}$ ; 3 –  $M=195,8$ ; 4 –  $M=220,3 \text{ МН*м}$ ; 5 –  $M=269,3 \text{ МН*м}$ ; 6 –  $M=293,7 \text{ МН*м}$ ; 7 –  $M=318,2 \text{ МН*м}$ ; 8 –  $M=342 \text{ МН*м}$

Рис.5 иллюстрирует динамику развития зон разрушения материалов в зоне концентрации деформаций в процессе прогрессирующего разрушения складки.

#### **4. Заключение.**

Таким образом, представленная здесь математическая модель и реализующая её программа «ПРОРАБ» позволяют анализировать процесс деформирования и разрушения железобетонных складчатых систем на всех стадиях нагружения. При этом учитываются такие факторы, как деформативные свойства материалов, особенности геометрии объекта (наличие проёмов, дефектов, повреждений, форма сечения, изменение геометрии в процессе возведения и эксплуатации и т.п.), влияние технологии возведения, характер действующих нагрузок и режим их приложения и т.д. В частности, такой анализ возможен для башенных сооружений промышленного назначения при режимах нагружения, имитирующих реальные ситуации их возведения и последующего догружения.

#### **Summary**

**Features of work of some the objects representing folded systems are considered. The proper preconditions taken as a principle of offered mathematical model of deformation and destruction nonelastic reinforced folded system, and also methods of its analysis are formulated. The calculation example is set.**

#### *Литература*

1. Левин В.М. Железобетонные башенные сооружения. Исследования, расчёт. - Макеевка: ДонДАБА, 1999. - 230 с.
2. Милейковский И.Е. Вариационный метод исходных уравнений в применении к расчёту «призматойдов» // Теория и расчёт сооружений / Труды ЦНИИСК им. Кучеренко. - Вып. 13. - М.: 1970 с. 18 - 25.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона.- М.: Стройиздат, 1966. - 416 с.