

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Трубобетонным конструкциям уже свыше ста лет и на сегодня довольно хорошо изучены особенности их работы в зависимости от геометрических характеристик, физико-механических свойств бетона ядра и материала оболочки, способа прикладывания нагрузки и ее продолжительности [1, 2, 3]. Поскольку все конструкции с годами эксплуатации изнашиваются (механические удары, коррозионные поражения), а иногда и при новом строительстве имеют место дефекты проката (трещины, царапины, отверстия) или изготовления (аномалии бетонирования) возникает необходимость учета влияния разных типов повреждений на напряженно-деформированное состояние (НДС) трубобетонных элементов с дефектами трубы-оболочки. Наряду с экспериментальными исследованиями, которые зачастую достаточно материалоемкие и трудоемкие, в наше время одним из прогрессивных методов анализа параметров напряженно-деформированного состояния строительных конструкций является моделирование их работы методом конечных элементов [4, 5]. Анализ литературы [6, 7], посвященной решению этой проблемы, подтверждает возможность использования методов математического моделирования (конечно-элементного анализа) работы строительных конструкций и для трубобетонных стоек [6, 7] с повреждениями трубы-оболочки. Однако при этом одним из наиболее существенных факторов, в конечном счете, обуславливающих точность результатов расчета, является правильность создания конечно-элементных моделей (задание свойств материалов, их совместную работу, приложение нагрузки и т.д.), то есть их адекватность с точки зрения математического описания действительной (реальной) работы строительных конструкций. Процедура конечно-элементного анализа эксплуатируемых конструкций существенно усложняется в связи с необходимостью моделирования их возможных дефектов и повреждений.

В связи с этим целью данной работы является разработка методики моделирования НДС трубобетонных элементов с повреждениями трубы-оболочки с использованием метода конечных элементов. В рамках данных исследований конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) трубобетонных образцов с дефектами трубы оболочки выполнялся с помощью программного комплекса NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis) Femap 10.1.1 SC 32bit / 64 bit (учебная демо-версия SDRC-FEMAP 8/1a S/N 000-00-00-DEMO-406F-00000000). Параметры напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов с дефектами, полученные с использованием математического моделирования тестировались (сравнивались) с результатами испытания физических лабораторных образцов (серии ТБп-1 и ТБп-2, конструкция и методика испытаний приведены в [8, 9, 10, 11]).

Методика исследования напряженно-деформированного состояния трубобетонных стоек с повреждениями трубы-оболочки методом конечных элементов, а именно создание конечно-элементной модели для определения НДС образцов и ее анализ проводился в следующей последовательности:

1. **Система координат.** Ее назначение состоит в указании положения точек в пространстве или на плоскости. При создании геометрии образцов была использована глобальная Декартова прямоугольная система координат.

2. **Геометрия модели.** Сначала создавался плоский поперечный разрез трубы с помощью кругов, которые задавались координатами узловых точек. Была учтена толщина стенки. Потом выполнялся контроль геометрических характеристик созданного плоского разреза одной трубы.

Дальше выполнялось копирование кольца и удлинение его на высоту образца, т.е. 400 мм и 440 мм для создания объемной модели (трубы). В стальных образцах объемная модель бетона ядра создавалась путем удлинения замкнутого плоского контура, образованного внутри трубы. Дефекты моделировались путем создания точной фигуры каждого из дефектов и вырезание ее пустоты из оболочки.

3. **Свойства материалов.** Материалы (сталь и бетон) задавались отдельно как изотропные, а их свойства – в виде скалярных величин с учетом физической нелинейности. Значение физико-механических характеристик материалов (модуль упругости Юнга E и коэффициент поперечных деформаций ν) и закон деформирования (σ - ϵ) брались согласно результатам испытаний материалов.

Соединение бетонного ядра и стальной оболочки осуществлялось с помощью специального контактного слоя толщиной $(1/6)t$ (где t – толщина трубы-оболочки), со сменными свойствами в нормальном и тангенциальном направлениях.

При исследовании стойкости сжатых элементов, материалы задавались упруго-пластическими с моделированием физической нелинейности с помощью ввода закона деформирования (σ - ϵ).

4. **Тип конечных элементов и разбивка модели на КЕ.** Заданные узловые точки во время создания геометрии связываются КЕ. В линейном статическом анализе элементы представляются упругими частичками. Эта математическая аппроксимация довольно приближенно описывает реальное поведение конструкции. Целью конечно-элементного моделирования является составление из дискретных частичек модели, которая наиболее достоверно описывает реальную конструкцию и ее работу. На выбор типа и размера КЕ повлияли время создания объемной конечно-элементной сетки, необходимое дисковое пространство для проведения ПК расчета, точность и сходимость полученных результатов при расчете моделей разбитых разными КЕ. Таким образом, по результатам анализа для создания объемной конечно-элементной сетки образцов были использованы трехмерные объемные элементы типа «Hex Meshing solid» – гексаэдры, с размером стороны элемента 3 мм, что составляет 0.7% от общей высоты образца.

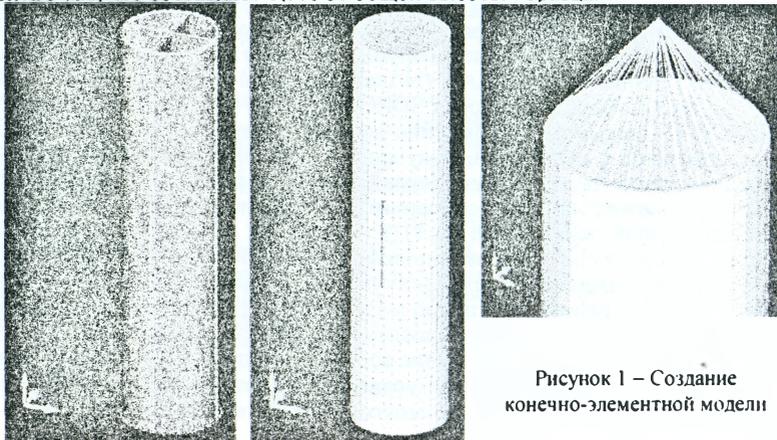


Рисунок 1 – Создание конечно-элементной модели

При расчете модели КЕ имеет значение симметричная сетка, так как в другом случае распределения напряжений и деформаций будут иметь несимметричный вид. Чтобы этого не случилось, перед разбивкой на КЕ тело разрезалось в двух симметричных плоскостях. После разбивки тела на КЕ выполнялось обязательное объединение совпадающих точек (узлов КЕ), что образовались в результате разбивки, для образования единого тела.

5. **Предельные условия** – связи, к которым крепится конструкция. Так как опорные плиты пресса были шарнирными, то для верхней поверхности образцов запрещались поступательные перемещения вдоль двух осей, перпендикулярных продольной оси элемента, а угловые перемещения и поступательные перемещения вдоль продольной оси элемента были разрешены. Для противоположной поверхности образцов запрещались все три поступательных перемещения, а углы были разрешенные.

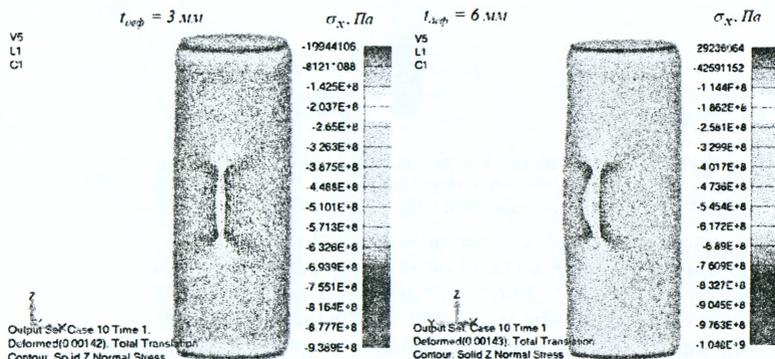


Рисунок 2 – Распределение нормальных напряжений в моделях трубобетонных образцов с локальным повреждением в виде сквозного послабления трубы-оболочки (тип «2»): при ширине повреждения 3 мм и 6 мм

6. **Формирование системы нагрузок.** Чтобы максимально приблизить “испытание” моделей образцов с помощью ЭВМ к реальному (физическому) эксперименту, нагрузка к объемной модели осуществлялась с помощью элемента типа «rigid».

7. **Проверка корректности разработанной модели.** После создания твердого тела удалялись лишние предельные поверхности, из-за которых могли возникнуть фатальные ошибки при расчетах. Также контролировалось качество и симметричность разбивки модели на КЕ, количество объединения совпадающие узлы конечно-элементной решетки, тип предельных условий, величины приложенных нагрузок и поверхности их распространения.

8. **Расчет конструкции** – конечно-элементный анализ. Как уже указывалось, модели рассчитывались на нелинейную статическую нагрузку. Загрузка моделей трубобетонных образцов осуществлялась степенями с 10 итерациями на каждой степени.

9. **Анализ полученных результатов расчетов и формирование их представления для практического использования.** Вследствие проведения расчетов КЕ с помощью ЭВМ были полученные графики распределения относительно главных осей деформаций и напряжений и их числовые значения с указанием экстремумов.

Примеры результатов конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния трубобетонных образцов с разными параметрами локальных повреждений трубы-оболочки приведены на рисунках 2 – 4.

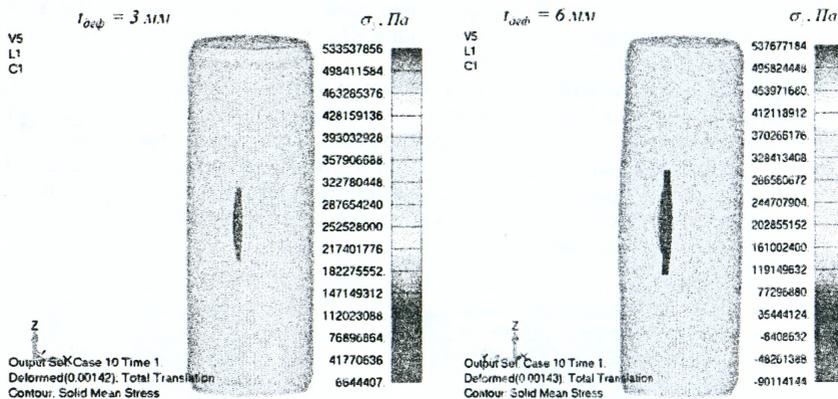


Рисунок 3 – Распределение максимальных главных напряжений в моделях трубобетонных образцов с локальным повреждением в виде сквозного послабления трубы-оболочки (тип «2»): при ширине повреждения 3 мм и 6 мм

Результаты проведенного конечно-элементного анализа свидетельствуют о влиянии параметров повреждений на характер работы трубобетонного элемента в целом. Так, в случае наличия сквозного вертикального ослабления происходит отрыв и потеря местной устойчивости трубы-оболочки в зоне повреждения (рис. 2-4), что не характерно для образцов с не сквозным ослаблением. Аналогичные результаты были получены и во время проведения физического эксперимента (рис. 5), что подтверждает адекватность принятых математических моделей для конечно-элементного анализа.

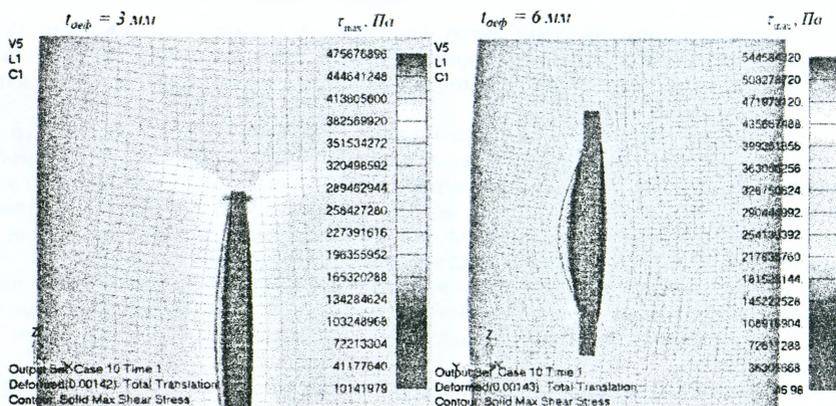


Рисунок 4 – Распределение максимальных касательных напряжений в моделях трубобетонных образцов с локальным повреждением в виде сквозного послабления трубы-оболочки (тип «2»): при ширине повреждения 3 мм и 6 мм

Увеличение ширины сквозного вертикального повреждения при его одинаковой длине приводит к росту нормальных напряжений (местах их концентрации - близ повреждения, рис. 2) около 10%, а касательных напряжений (рис. 4) - почти на порядок. Нужно также отметить, что во время проведения физического эксперимента в образцах типов «2» и «3» (трубобетонные образцы с повреждениями трубы-оболочки в виде продольного сквозного пропила) не наблюдалось развитие повреждения в вертикальном направлении, которое отвечает картине напряженно-деформированного состояния, полученной в результате их математического моделирования.

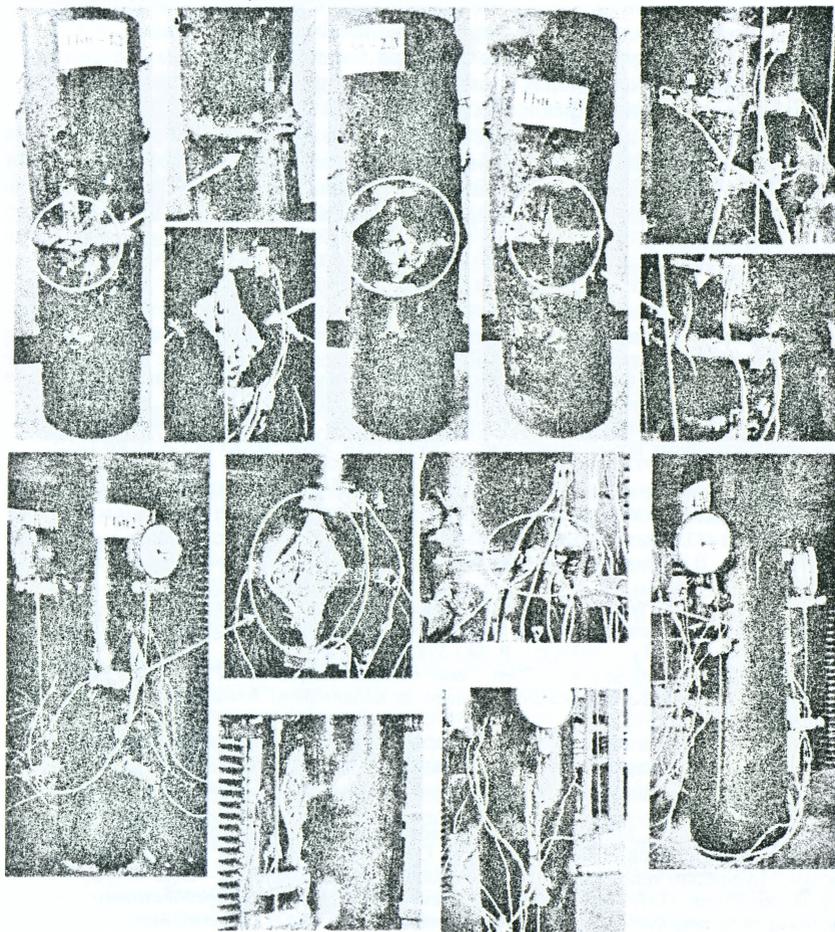


Рисунок 5 – Характер разрушения исследовательских образцов трубобетонных элементов с разными типами механических повреждений трубы-оболочки

Использованная методика исследования НДС моделей трубобетонных элементов с повреждениями трубы-оболочки в программном комплексе «NASTRAN» с применением метода конечных элементов дает возможность исследовать осо-

бенности действительного напряженно-деформированного состояния таких элементов. В результате проведенного математического моделирования напряженно-деформированного состояния были выявлены зоны концентраций напряжений вблизи повреждений (ослаблений) трубы-оболочки трубобетонных элементов, а сравнение с экспериментальными данными доказало адекватность использованной модели.

Выводы

В статье предложен алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов с повреждениями трубы-оболочки методом конечных элементов, а именно создание конечно-элементной модели для определения НДС экспериментальных образцов и анализ их работы. Принятые расчетные модели строительных конструкций в программном комплексе достоверно описывают работу реальных конструкций.

Моделирование напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов с повреждениями трубы-оболочки позволяет: во-первых – выявить зоны с максимальными напряжениями и деформациями в местах локализации дефектов; во-вторых – спрогнозировать наиболее опасные «сценарии» разрушение подобных конструктивных элементов; в-третьих – сократить число экспериментальных образцов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Семко, О.В. Імовірнісні аспекти розрахунку сталезалізобетонних конструкцій [Текст]: монографія / О.В. Семко. – К. : Сталь, 2004. – 316 с.
2. Воскобойник, О.П. Сталезалізобетон: надійність, технічні стани, ризики [Текст]: монографія / О.П. Воскобойник. – Донецьк: Донбас, 2014. – 394 с.
3. Гасенко, А.В. Надійність сталезалізобетонних стійок, виконаних із швелерів, з урахуванням експлуатаційних пошкоджень: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.В. Гасенко. – Полтава, 2008. – 231 с.
4. Кобринец, В.М. Расчет сжато-изогнутых стержней из композитных материалов / В.М. Кобринец, Н.П. Вытыкач // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. трудов. – Одесса: ОДАБА. – 2001. – С. 123–129.
5. Шимкович, Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК, 2003. – 448 с.
6. A. Bahrami, W.H. Wan Badaruzzaman and S.A. Osman. Nonlinear analysis of concrete-filled steel composite columns subjected to axial loading. *Structural Engineering and Mechanics-An International Journal*, 2011. – №39(3) – P. 383-398.
7. H.T. Hu, C.S. Huang and Z.L. Chen. Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination. *Journal of Constructional Steel Research*, 61:1692 - 1712, 2005.
8. Югов, А.М. Исследование организации технологических решений возведения трубобетонных конструкций в каркасных зданиях [Текст] / А.М. Югов, В.В. Таран // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2013. – Вип. 27. – С. 398–406.
9. Воскобойник, О.П. Методика експериментальних досліджень трубобетонних елементів з пошкодженнями труби-оболонки [Текст] / О.П. Воскобойник, І.О. Пархоменко, Є.В. Дмитренко // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К. : НДІБК, 2012. – Вип.74. – С. 152–159.
10. Воскобойник, О.П. Методика експериментальних досліджень трубобетонних елементів з дефектами та експлуатаційними пошкодженнями [Текст] / О.П. Воскобойник, І.О. Пархоменко, О.О. Бурцайло // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2012. – Вип.№23. – С. 133-140.
11. Воскобойник, О.П. Експериментальні дослідження трубобетонних елементів з локальними пошкодженнями труби-оболонки [Текст] / О.П. Воскобойник, А.В. Гасенко, І.О. Пархоменко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП. –2013. – Вип.№25.