

А. Л. ТЮТЬКИН (ДИИТ)

## МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ПИЛОННОЙ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА С УЧЕТОМ ПРИСОЕДИНЕННЫХ МАСС ГРУНТА

У статті викладені результати модального аналізу конструкції станції метрополітену пилонного типу глибокого закладення. Проведено порівняння результатів розрахунку моделей станції без оточуючого масиву та з урахуванням приєднаних мас ґрунту.

В статье представлены результаты модального анализа конструкции станции метрополитена пилонного типа глубокого заложения. Проведено сравнение результатов расчета модели станции без окружающего массива и с учетом присоединенных масс грунта.

In the article the results of modal analysis of metropolises station construction of pylon type of deep contour interval are represented. Comparison of results of calculation of station model without a surrounding array and taking into account added the masses of ground are conducted.

Проблемой комплексного анализа прочности, надежности и долговечности тоннельных конструкций в последнее время стало наиболее полное отображение в исследовании свойств реального сооружения, моделировании существенных параметров его статического и динамического поведения, учета особенностей возникновения, формирования и изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) таких сложных систем, как подземные сооружения. Решение данной общей проблемы, которая складывается из множества частных вопросов, даст возможность получения наиболее полной и четкой репрезентативной информации о поведении конструкции, ее НДС, прочности. Это, в свою очередь, даст возможность создания новых оптимальных тоннельных конструкций, отличающихся высокой технологичностью создания, конструкций, которые наиболее полно используют прочностной ресурс материалов, из которых созданы, и поддерживающее взаимодействие окружающего массива. Два последних положения наиболее точно отражают тенденцию создания новых типов тоннельных конструкций, в которых используются новые высокопрочные бетоны на основе новых вяжущих и композитные материалы, а также элементы конструкций, которые наиболее полно соответствуют окружающему массиву, с которым взаимодействуют.

Концептуальной основой комплексного анализа строительных конструкций является исследование НДС и анализ результатов при эксплуатационных и строительных нагрузках, которые регламентируются ДБН. Однако, существующие и повсеместно применяющиеся методики расчетов элементов трехсводчатых

станций, к которым относятся станции пилонного или колонного типа, основываются на построении плоских расчетных схем конструкции и интерпретации окружающего массива с некоторыми предположениями, которые упрощают его реальное поведение. Данные принципы моделирования не позволяют отобразить адекватно реальному объекту его свойства в модели и, соответственно, верно определить НДС тоннельной конструкции, поскольку отбрасывается такой важный фактор, как пространственность работы и реальное взаимодействие между оболочкой станции и окружающим массивом [1; 2]. В результате конструкции пилонных станций могут считаться нерациональными и неэкономичными [3].

Следует также отметить, что развитие расчетов станций метрополитена и других сложных подземных сооружений [4–7] наиболее полно проявилось в задачах статической постановки. Это объясняется тем, что решение даже таких задач, в которых учитываются факторы взаимодействия конструкции и массива, сложные конфигурации станционных конструкций с вырезами и скачкообразным изменением жесткостей, нелинейное поведение грунтов и пород, очень сложно в математическом плане. Поэтому развитие аналитических решений постепенно прекратилось, так как учет вышеперечисленных факторов серьезно затрудняет решение или делает его невозможным. Развитие численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ), дало возможность проведения не только статических расчетов, но и некоторых видов динамического анализа конструкций подземных сооружений, что ранее было практически невозможно и доказывается очень

малым объемом работ в этой области. Также следует отметить, что проведение даже анализа собственных частот и форм для станции любого типа с учетом или без учета присоединенных масс грунта было или невозможным или выполнялось на основе простейших двух- или трехмассовых моделей. Такой подход к решению динамических задач не может считаться плодотворным, и поэтому автором в данной работе проводится модальный анализ конст-

рукции пилонной станции с учетом и без учета присоединенных масс грунта. Причем модель для решения задачи поиска собственных форм и частот учитывает реальные инерционные и деформационные характеристики сооружения, в ней учтен пространственный фактор работы системы «проем-пилон-проем» и взаимодействие элементов конструкции с окружающим массивом (рис. 1).

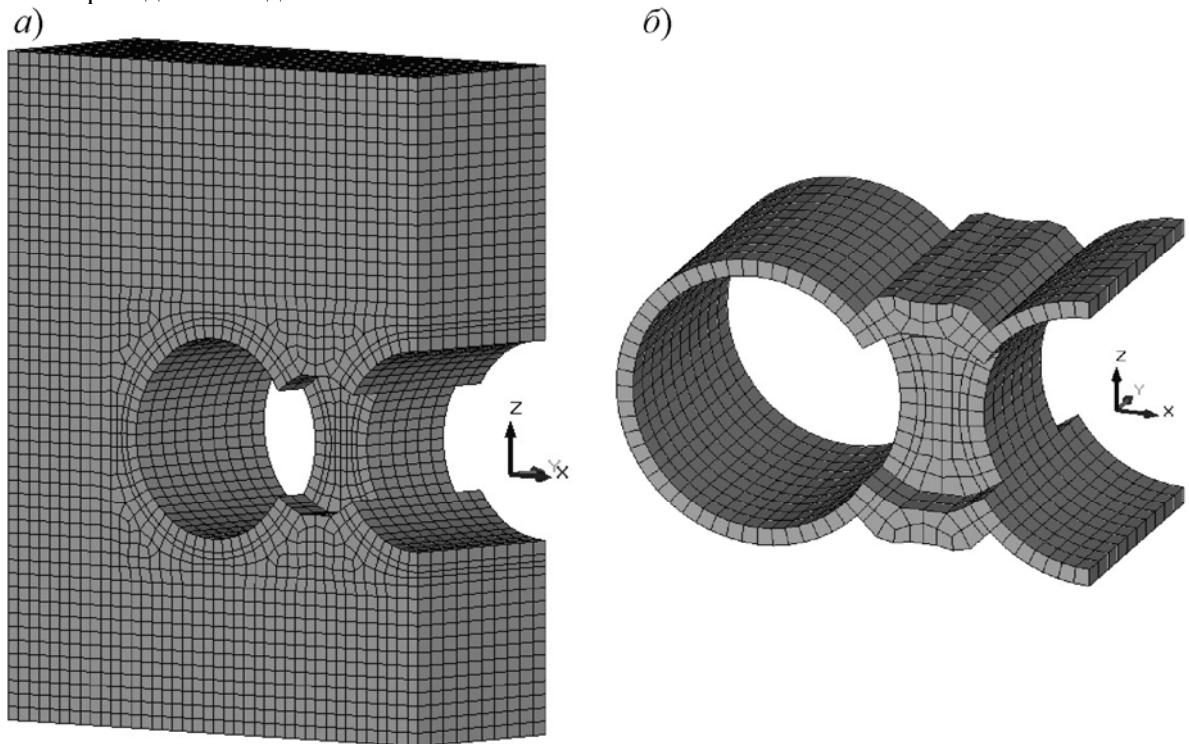


Рис. 1. Конечно-элементная модель пилонной станции на основе объемных конечных элементов: а – общая модель; б – обделка станции (фрагмент системы «проем-пилон-проем»)

Сущность модального анализа конструкции заключается в отыскании форм свободных колебаний, которые соответствуют некоторому распределению деформаций в конструкции, при определенной частоте. Общее уравнение колебаний для системы со многими степенями свободы при решении МКЭ в матричном виде:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [B]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\} + \{N\}, \quad (1)$$

где  $\{x\}$  – вектор перемещений;  $[M]$  – матрица масс;  $[B]$  – матрица демпфирования;  $\{P\}$  – вектор внешнего воздействия;  $\{N\}$  – вектор нелинейных сил.

Уравнение колебаний для системы со многими степенями свободы при свободных колебаниях можно преобразовать в следующее выражение

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0. \quad (2)$$

Для решения уравнения свободных колебаний (2) следует подставить гармоническое ре-

шение в следующем виде:

$$\{x\} = \{\phi\}e^{i\omega t}. \quad (3)$$

Данное уравнение отображает важное свойство свободных колебаний, которое заключается в синхронном движении, то есть форма деформаций системы остается постоянной, меняется только ее амплитуда.

Проведя дифференцирование уравнения (3) для подстановки в уравнение (2)

$$\{\ddot{x}\} = -\omega^2 \{\phi\}e^{i\omega t}. \quad (4)$$

Подставив уравнения (3) и (4) в уравнение (2) и сокращения на множитель  $e^{i\omega t}$ , оно записывается в виде формулировки задачи о собственных значениях:

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0. \quad (5)$$

Для получения нетривиального решения при

отыскании собственных частот необходимо, чтобы  $\det([K] - \omega^2[M]) = 0$  относительно  $\{\phi\}$ .

Таким образом, конструкция с числом динамических степеней свободы  $N$  имеет  $n$  чисел  $\omega$ , которые будут решением задачи о соб-

ственных значениях. Эти числа и являются собственными частотами.

Используя профессиональный расчетный комплекс SCAD, на основе разработанной модели проведен ее модальный анализ с определением частот и форм собственных колебаний (рис. 2).

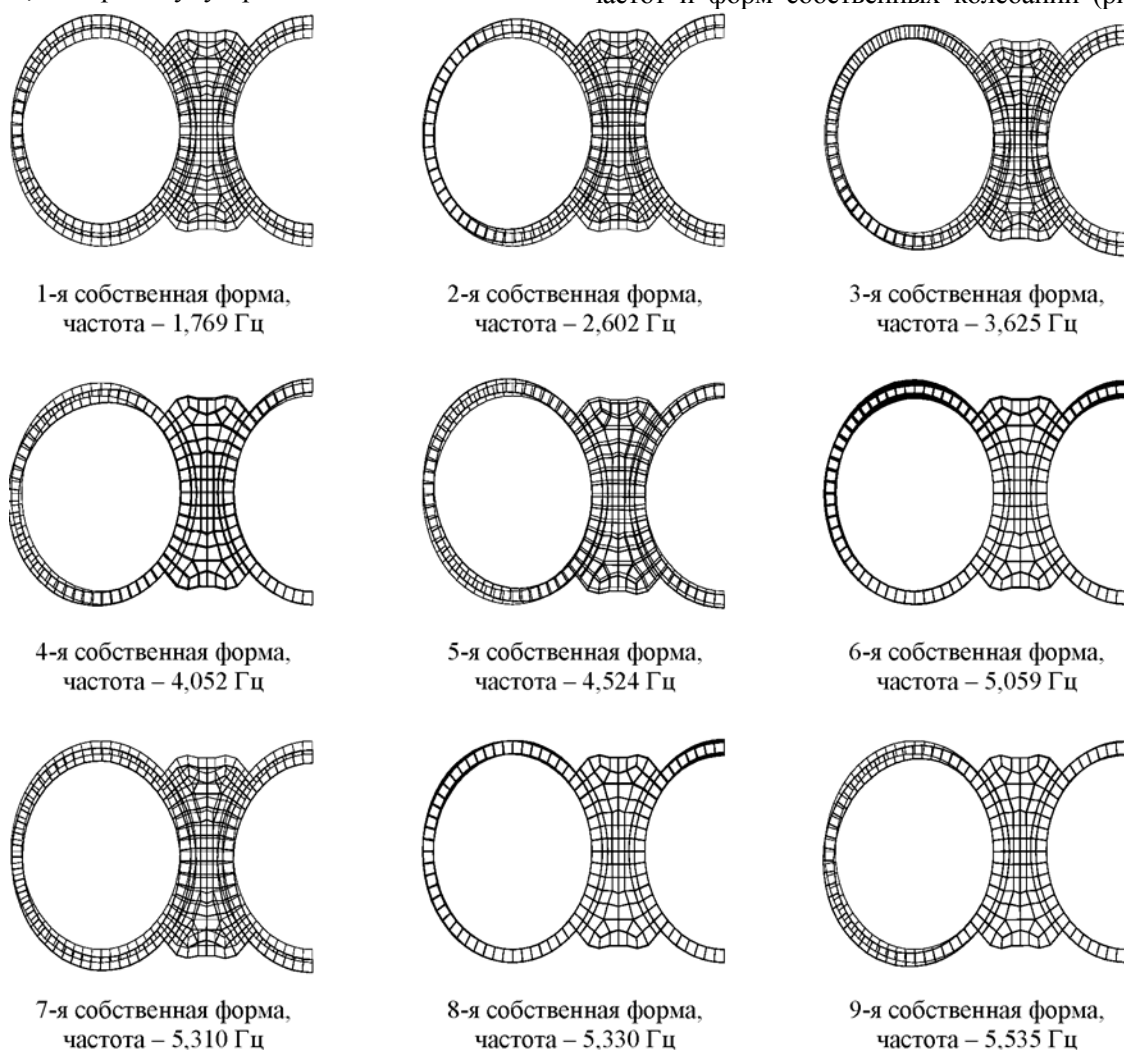


Рис. 2. Результаты модального анализа конечно-элементной модели пилонной станции (с учетом присоединенной массы грунта массива)

Полученные формы свободных колебаний можно охарактеризовать как деформации конструкции в вертикальной плоскости, лишь 6-я, 8-я и 10-я собственные формы характеризуется изгибными деформациями верха бокового и среднего станционных тоннелей. Следует отметить, что разработанная модель также не является наиболее информативной в смысле результатов, так как она создана с учетом симметрии системы «обделка-массив», то есть правая часть системы заменена условием симметрии по вертикальной оси. Таким образом, этот прием моделирования, полностью корректный в решении задач в статической постановке, несколько некорректен для решения динамических задач, в том числе и модального анализа,

так как все кососимметричные формы колебаний не могут быть определены, что несколько снижает важность исследований. Но данная проблема возникла из условий расчета, а точнее, созданная модель (около 17 тысяч конечных элементов, около 50 тысяч динамических степеней свободы) не могла быть увеличена, так как время расчета значительно увеличивалось, но еще более увеличивался объем файлов решения (около 26...28 Гб), что не позволяло выполнить расчет на компьютере с небольшим объемом памяти. Несомненно, модальный анализ полной схемы возможен на более современных компьютерах.

Кроме модального анализа конструкции пилонной станции с взаимодействием окружаю-

шего массива проведен анализ модели без окружающего массива (рис. 3), и найдены формы и частоты для этого случая (рис. 4).

Несомненно, модель, приведенную на рис. 3, нельзя считать полностью освобожденной от присоединенных масс грунта, но ситуация, когда вся станционная конструкция свободна от массива, невозможна физически. Анализ полученных результатов модального анализа конструкции пилонной станции без учета присоединенных масс грунта позволяет сделать вывод, что 4-я, 6-я, 8-я и 9-я формы колебаний являются изгибными, причем, в отличие от форм собственных колебаний с присоединенными массами грунта, изгиб проявляется в лотковой (примерно до горизонтального диаметра) части бокового тоннеля. Изгибные формы свободных колебаний с присоединенными массами отличаются наличием изгиба в верхней части конструкции тоннелей, что было отмечено выше, и может характеризовать действие грунтового

массива на колебания конструкции станции. Остальные формы, как и в случае присоединенных масс, являются деформациями системы относительно вертикальной плоскости.

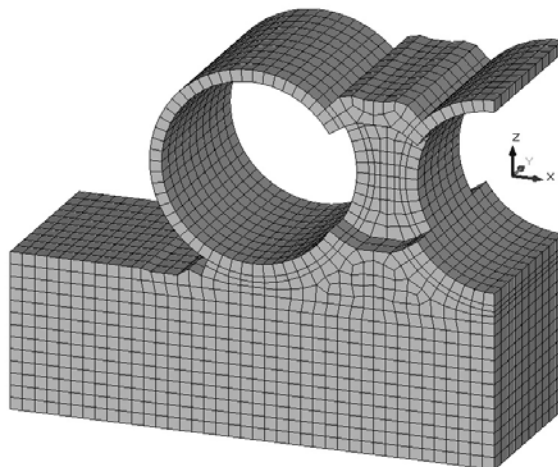


Рис. 3. Конечно-элементная модель пилонной станции без окружающего массива

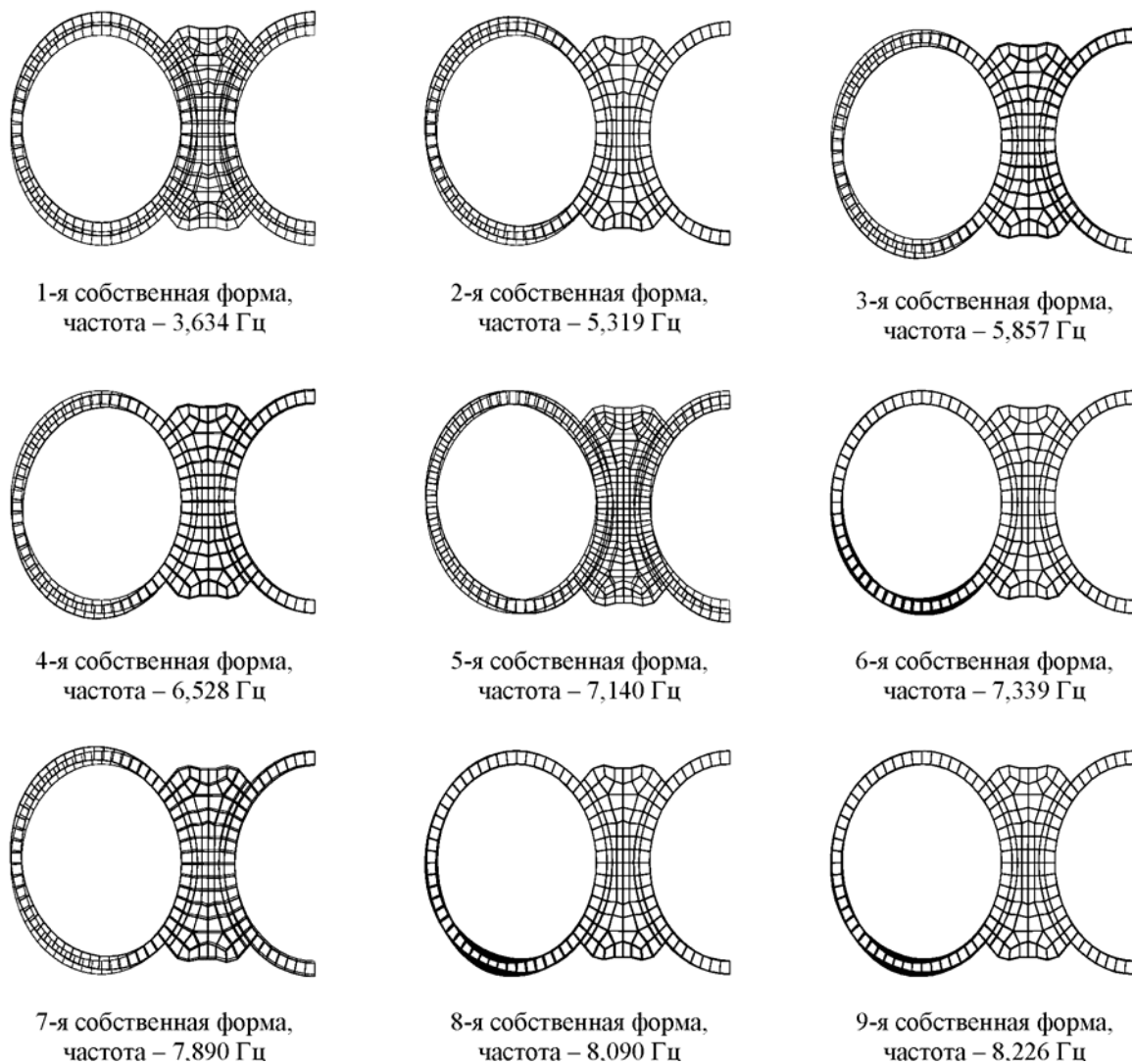


Рис. 4. Результаты модального анализа конечно-элементной модели пилонной станции (без присоединенной массы грунта массива)

Собственно анализ форм колебаний малоинформативен, так как параметры форм колебаний являются относительными величинами и свидетельствуют только о характере распространения деформаций. Поэтому кроме форм проведен сравнительный анализ собственных частот, которые относятся к данным формам (рис. 3-4). Как видно из представленных результатов в обоих случаях частоты первых девяти форм располагаются в пределах от 1,769 (основной тон пилонной станции с окружающим грунтом) до 8,226 Гц (9-я форма колебаний пилонной станции без окружающего грунта), причем основной тон конструкции без присоединенных масс – 3,634 Гц. Таким образом, присоединенные массы грунта уменьшают частоту собственных колебаний станционной конструкции пилонной станции примерно на 1,6...2,7 Гц. Следует отметить, что воздействий, которые присутствуют при сооружении и эксплуатации метрополитена, с частотами близкими к частотам собственных колебаний, нет, поэтому резонансных явлений не наблюдается. Это поясняется характером частот и самой конструкции и влиянием присоединенных масс, так как их величины находятся в низкочастотном регистре и характерны для землетрясений.

Проведенный модальный анализ пилонной станции с учетом и без учета присоединенных масс грунта является первым этапом динамического анализа, так как выяснение форм и частот собственных колебаний считается первой задачей такого рода исследования, и может быть основой для динамического анализа конструкций станций на поездную гармоническую нагрузку или спектр воздействий различного типа.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демешко Е. А. Расчет колонной станции метрополитена как пространственной конструкции / Е. А. Демешко, С. Б. Косицын, А. Е. Слемзин // Транспортное строительство. – 1992. – № 1. – С. 32–35.
2. Петренко В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін. – Д.: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
3. Петренко В. Д., Тютькин А. Л. Особенности работы конструкции как основа оптимизации ее конструктивных элементов / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин // Міжвід. наук.-тех. зб. наук. праць «Будівельні конструкції». – К.: НДІБК, 2002. – Вип. 56. – С. 134–141.
4. Современные методы прочностных расчетов в метро- и тоннелестроении / Е. А. Демешко, С. Б. Косицын, Сергеев В.К., Д. Б. Долотказин, А. С. Косицын, О. А. Потапова // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Подземное строительство России на рубеже XXI века», Москва, 15–16 марта 2000. – М.: ТАР, 2000. – С. 200–207.
5. Петренко В. Д. Числовий аналіз залізобетонної конструкції колонної станції метрополітену із змінним кроком колон / В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін, Д. С. Кавун // Зб. наук. пр. Луганського нац. аграрн. ун-ту. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2007. – С. 27–33.
6. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П. Расчет несущих элементов подземных сооружений. – К.: Наук. думка, 2001. – 168 с.
7. Петренко В. Д. Модальний аналіз конструкції станції колонного типу мілкого закладення / В. Д. Петренко, О. Л. Тютькін, Р. Борисенко // Мат. междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений». – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – Вип. 13. – С. 111–112.

Поступила в редколлегию 30.07.2007.