

УДК 624.191.8.042/044

## КОМПЛЕКСНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПИЛОННОЙ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

**В. Д. Петренко, А. Л. Тюткин**

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна ул. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, 49010, Украина. E-mail: tutkin@mail.ru

Приведены результаты комплексного динамического анализа пилонной станции с определением динамических характеристик (формы и частоты) и напряженно-деформированного состояния при импульсном воздействии. Актуальность работы заключается в решении проблемы совокупного определения напряжений, деформаций и динамических характеристик таких сложных тоннельных конструкций. Материал и результаты исследований получены на основе новых конечно-элементных моделей пилонной станции глубокого заложения, которая позволила провести самый глубокий динамический анализ, который является частью комплексного анализа тоннельных конструкций. Выводами по работе стали результаты модального и импульсного анализов пилонной станции, которые свидетельствуют об их важности для этой конструкции.

**Ключевые слова:** пилонная станция, комплексный анализ, формы колебаний, частоты колебаний, напряженно-деформированное состояние.

## КОМПЛЕКСНИЙ ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПІЛОННОЇ СТАНЦІЇ МЕТРОПОЛІТЕНУ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДЕННЯ

**В. Д. Петренко, О. Л. Тюткін**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна. E-mail: tutkin@mail.ru

Наведені результати комплексного динамічного аналізу пилонної станції із визначенням динамічних характеристик (форми і частоти) й напружено-деформованого стану при імпульсній дії. Актуальність проведеної роботи полягає у рішенні проблеми сукупного визначення напружень, деформацій та динамічних характеристик таких складних тунельних конструкцій. Матеріал і результати досліджень отримані на основі нових скінченно-елементних моделей пилонної станції глибокого закладення, яка дозволила провести найбільш глибокий динамічний аналіз, який є частиною комплексного аналізу тунельних конструкцій. Висновками по роботі стали результати модельного і імпульсного аналізів пилонної станції, які свідчать про їх важливість для цієї конструкції.

**Ключові слова:** пилонна станція, комплексний аналіз, форми коливаль, частоти коливаль, напружено-деформований стан.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Проблемой исследования поведения тоннельных конструкций, в частности станций метрополитена глубокого заложения, является создание математических моделей, которые были бы наиболее адекватны реальному сооружению. Данная проблема позволяет определить три аспекта, решение которых обеспечивает получение наиболее детальной и адекватной реальной тоннельной конструкции картины поведения модели, то есть исследовать действительную конструкцию виртуально. Эти три аспекта таковы:

1) отражение реального взаимодействия между элементами общей системы «тоннельная конструкция – окружающий массив» и их свойств в конечно-элементной модели;

2) детальный анализ полученных результатов;

3) учет возможных состояний системы.

Таким образом, данные аспекты проблемы являются ядром концепции комплексного анализа тоннельных конструкций и определяют ее актуальность в области подземных сооружений.

Решение данной проблемы, которая складывается из множества частных вопросов и задач, даст возможность получения наиболее полной информации о поведении конструкции и ее напряженно-деформированном состоянии (НДС). Самый полный комплексный анализ подразумевает проведение нескольких типов исследований, например, статического, модального и динамического, совокупные

результаты которых являются наиболее репрезентативной информацией о поведении конструкции.

Целью данной работы является проведение комплексного динамического анализа, который включает модальный анализ и исследование импульсного воздействия.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Современные инженерные методики расчетов элементов подземных сооружений, к которым относятся трехсводчатые станции типа, основываются на построении плоских расчетных схем конструкции и интерпретации окружающего массива, как чисто упругого тела [1, 2]. Данные принципы моделирования не позволяют адекватно отобразить свойства реального сооружения в модели и, соответственно, верно определить НДС тоннельной конструкции, так как в ходе расчета отбрасывается такой важный фактор, как пространственность работы и реальное взаимодействие между обделкой станции и массивом.

Следует отметить, что развитие расчетов НДС подземных сооружений в статической постановке развивается более интенсивно, в отличие от динамических расчетов [3, 4]. Это объясняется тем, что исследование динамических характеристик трехсводчатых станций пилонного типа, очень сложно по причине пространственности конструкции.

При исследовании форм и частот в данной работе, автор пользовался пространственными моделя-

ми, которые была разработаны им на основе профессионального комплекса SCAD (рис. 1) [5].

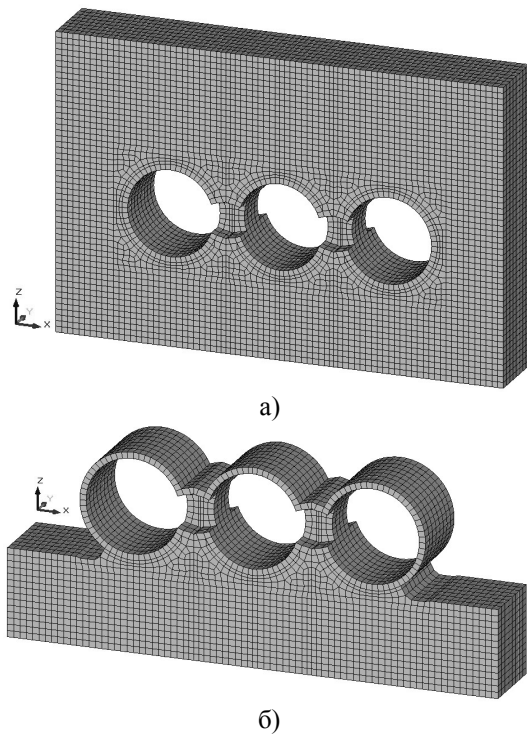


Рисунок 1 – Общий вид пространственных конечно-элементных моделей: а) с учетом присоединенных масс; б) без учета присоединенных масс

Данные модели адекватны реальным характеристикам пилонной станции, т.к. при их создании учтены геометрические и деформационные параметры обделки, а также деформационные свойства грунта окружающего массива. Модели проверены с позиции сходимости конечно-элементного решения, закрепления наиболее полно соответствуют случаю воздействия собственного веса массива, абсолютные размеры модели подобраны в результате нескольких итераций и позволяют наиболее полно отображать динамическое поведение системы с учетом и без учета присоединенных масс.

Модальный анализ является первым шагом алгоритма динамического анализа, так как его результаты являются первичными данными о динамическом характере системы [3, 6]. 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 [3]:

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

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

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

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

Для решения уравнения свободных колебаний (2) следует подставить гармоническое решение 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 её амплитуда. Проведя двойное дифференцирование уравнения (3), получим

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

После подстановки уравнения (3) и (4) в уравнение (2) и сокращения на множитель  $\{\phi\}e^{i\omega t}$ , 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, и являются собственными частотами.

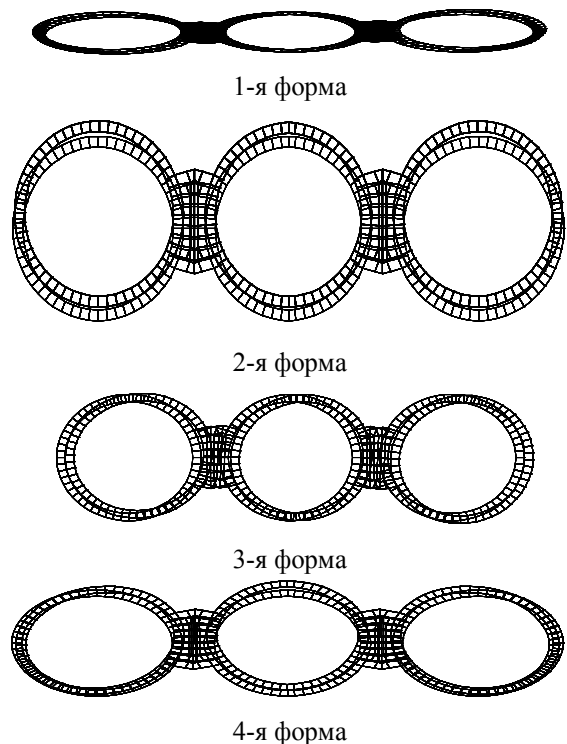


Рисунок 2 – Формы колебаний фрагментов моделей с учетом присоединенных масс

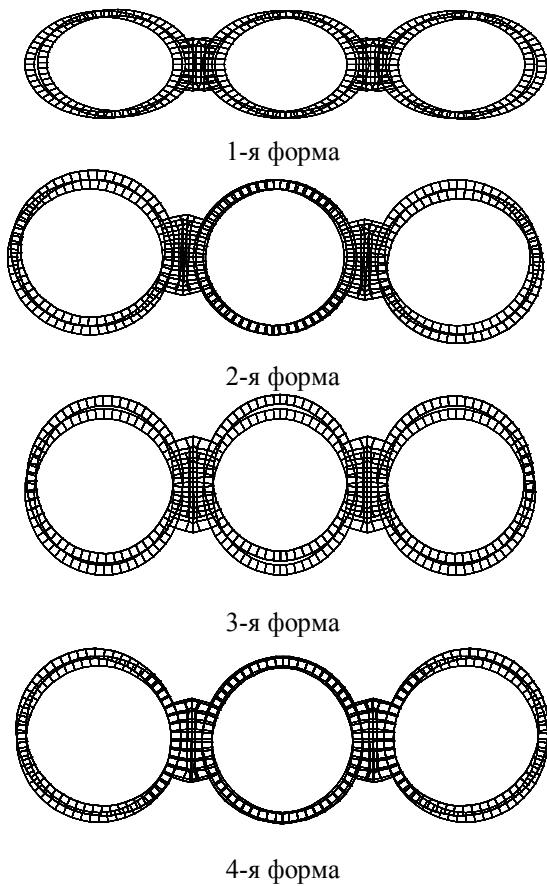


Рисунок 3 – Формы колебаний фрагментов моделей без учета присоединенных масс

В рамках модального анализа моделей, исследованы 12 первых форм собственных колебаний, приведены избранные результаты исследований (рис. 2, 3) в виде форм свободных колебаний и параметры колебаний, которые соответствуют этим формам, полученные в ходе модального анализа с учетом и без учета присоединенных масс (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры модального анализа конструкции пилонной станции

Номер формы	Собственные значения		Собственная частота, Гц	
	С учетом	Без учета	С учетом	Без учета
1	0,0988	0,0694	1,6114	2,2934
2	0,0956	0,0443	1,6656	3,4212
3	0,0759	0,0443	2,0976	3,5916
4	0,0665	0,0337	2,3926	4,7218
5	0,0496	0,0311	3,2049	5,1144
6	0,0456	0,0299	3,4927	5,3278
7	0,0442	0,0273	3,6011	5,8422
8	0,0397	0,2439	4,0095	6,5297
9	0,0391	0,0238	4,0689	6,6832
10	0,0370	0,0223	4,2981	7,1130
11	0,0349	0,0224	4,5676	7,1132
12	0,0332	0,0222	4,7963	7,1648

Вторым шагом комплексного динамического

анализа является исследование стационарной конструкции пилонного типа при импульсном воздействии. Для его исследования модель пилонной станции в методе конечных элементов (рис. 1) была перестроена для того, чтобы можно было более детально проанализировать действие импульса (рис. 4).

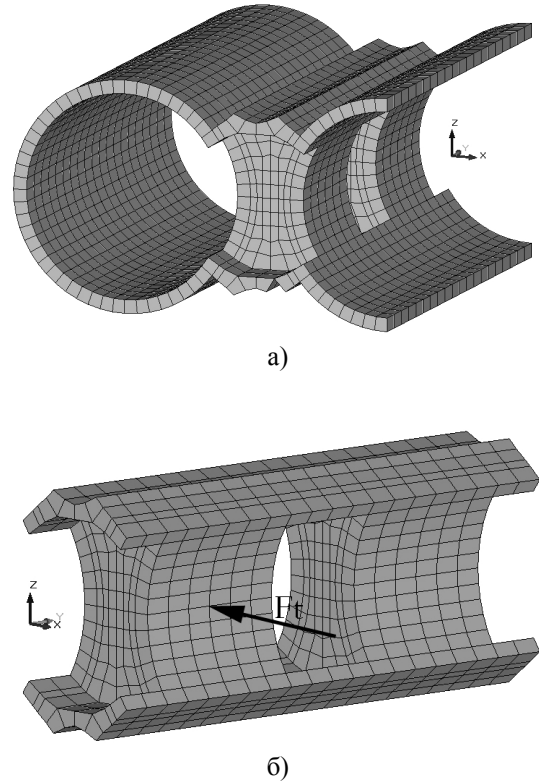


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель пилонной станции: а) фрагмент модели – стационарная конструкция; б) система «пол проема–пилон–проем–пилон–пол проема» (стрелкой обозначено место приложения импульса)

Характеристики модели: количество узлов – 40 425, конечных элементов – 35 880. Рассмотрены три варианта импульса (местоположение импульса оставалось постоянным, рис. 4,б):

1 вариант. Время действия импульса – 0,0005 с, значение импульса – 5 кН·с.

2 вариант. Время действия импульса – 0,0006 с, значение импульса – 10 кН·с.

3 вариант. Время действия импульса – 0,00065 с, значение импульса – 15 кН·с.

Известно, что результаты действия взрывной нагрузки, имеющей импульсный характер, на тоннельные конструкции определяют в ходе решения уравнений динамики сооружений, в которых учитываются инерционные (масса конструкции и её элементов), жесткостные (жесткость конструкции, связанная с её геометрическими размерами и свойствами материала) и прочностные параметры. Также известно, что ответ сооружения (реакция-отклик конструкции сооружения) на динамические взрывные воздействия (о важности учета и прогнозирования таких воздействий детально изложено в работах

[3, 4, 7]) связан с их длительностью и временем релаксации конструкции, которое практически можно принимать равным периоду основного тона (первой формы) собственных колебаний. Зависимость давления во времени в определенной точке может быть представлена в виде кривой (рис. 5).

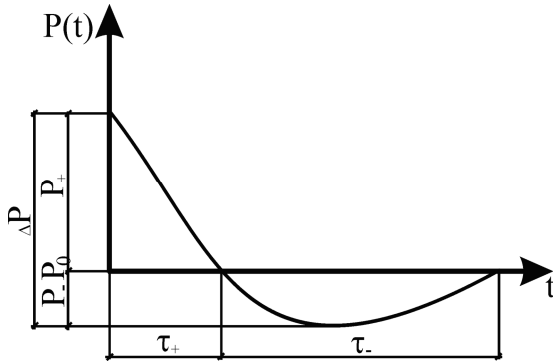


Рисунок 5 – Зависимость давления во времени от взрывного воздействия

Таким образом, в кинетике и распространении давления в результате взрыва можно выделить две фазы: фазу сжатия, которая характеризуется давлением  $P_+$  и длительностью  $\tau_+$ , и фазу разрежения, которая характеризуется давлением  $P_-$  и длительностью  $\tau_-$ . Определение параметров взрыва производится по известным формулам академика М.А. Садовского. Также известно, что максимальное давление  $P_{max}$  описывается зависимостью, определяемой на контакте двух сред «заряд ВВ – воздух» или в плоскости Чепмена–Жуге, причем его значение резко падает с расстоянием от источника взрыва.

Из рис. 5 видно, что форма кривой, описывающей фазу сжатия достаточно точно можно аппроксимировать прямой линией и значение импульса будет равно  $I_+ = \frac{1}{2} P_+ \tau_+$ .

Таким образом импульс, образующийся в фазе сжатия, можно считать треугольным (рис. 6).

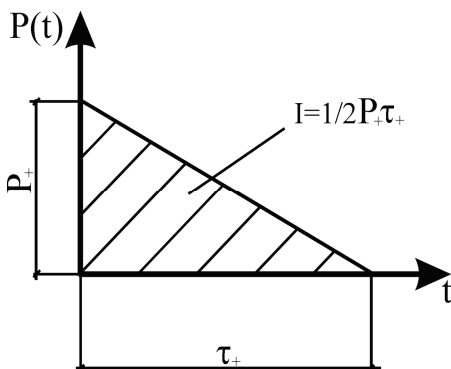


Рисунок 6 – Импульс взрывной нагрузки треугольной формы

Такое представление импульсного воздействия

взрыва имеет практическую ценность, так как форма импульса в данном случае существенно влияет на результаты динамического расчета конструкций на особое сочетание нагрузок [1, 3]. Но, даже зная основные параметры ударно-взрывной или ударно-воздушной волны, динамический расчет тоннельных конструкций на импульсное воздействие остается достаточно сложным. Причиной этого является применение очень упрощенных расчетных схем конструкций, которые не отражают особенности их работы, например, плоские стержневые схемы со сосредоточенными массами вместо пространственных схем с объемными элементами [5, 6].

Некоторую сложность также представляет процесс анализа полученных результатов, так как специфика динамических задач заключается в исследовании действия нагрузок, изменяющихся во времени. Таким образом, анализ НДС конструкции сводится к анализу только деформированного состояния, как наиболее значительного массива информации, заключающегося в наборе форм колебаний с известными частотами и перемещениями. Анализ пиковых значений напряжений в динамических расчетах по известным деформациям встречается нечасто, так как поиск напряжений по известным деформациям на основе аналитического подхода затруднен.

Однако с появлением МКЭ стало возможным проводить не только модальный анализ, но и решать динамические задачи на ударные, импульсные и вибрационные воздействия [3, 7] с получением не только форм с их частотами и перемещениями, но и пиковых значений напряжений.

Принятый в практических расчетах импульс имеет треугольную форму, характер импульса – затухающий, без повторения, ось действия – горизонтальная (ось X). Коэффициент неупругого сопротивления материала – 0,0957 (для железобетонных конструкций). Для грунтового массива коэффициент неупругого сопротивления не задавался, так как зона затухания импульса выражается в десятках сантиметрах (что в дальнейшем подтвердилось результатами всех трех расчетов). Деформационные характеристики модели распределяются таким образом: жесткость 1 – железобетон, модуль упругости  $E=3,51 \cdot 10^7$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu=0,03$ , плотность  $\gamma=2,5$  т/м<sup>3</sup>; жесткость 2 – глина сухая, модуль упругости  $E=32$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$ , плотность  $\gamma=2,0$  т/м<sup>3</sup>; жесткость 3 – бетон В12,5, модуль упругости  $E=2,3 \cdot 10^7$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu=0,2$ , плотность  $\gamma=2,4$  т/м<sup>3</sup>. По окончании моделирования схемы проводился расчет.

Ниже приведены результаты деформированного и напряженного состояния при всех трех вариантах воздействия импульсной нагрузки на стационарную конструкцию (рис. 7–9).

Качественно картины перемещений и напряжений идентичны, что свидетельствует о тождественном влиянии импульсного воздействия на стационарную конструкцию. Анализ горизонтальных перемещений дает возможность заключить, что воздействие импульсов таких значений значительно де-

формуєт обделку станції – смещение пилона в сторону бокового станционного тоннеля составляет от 6 до 13 мм (максимально – 12,85 мм, первый слу-чай).

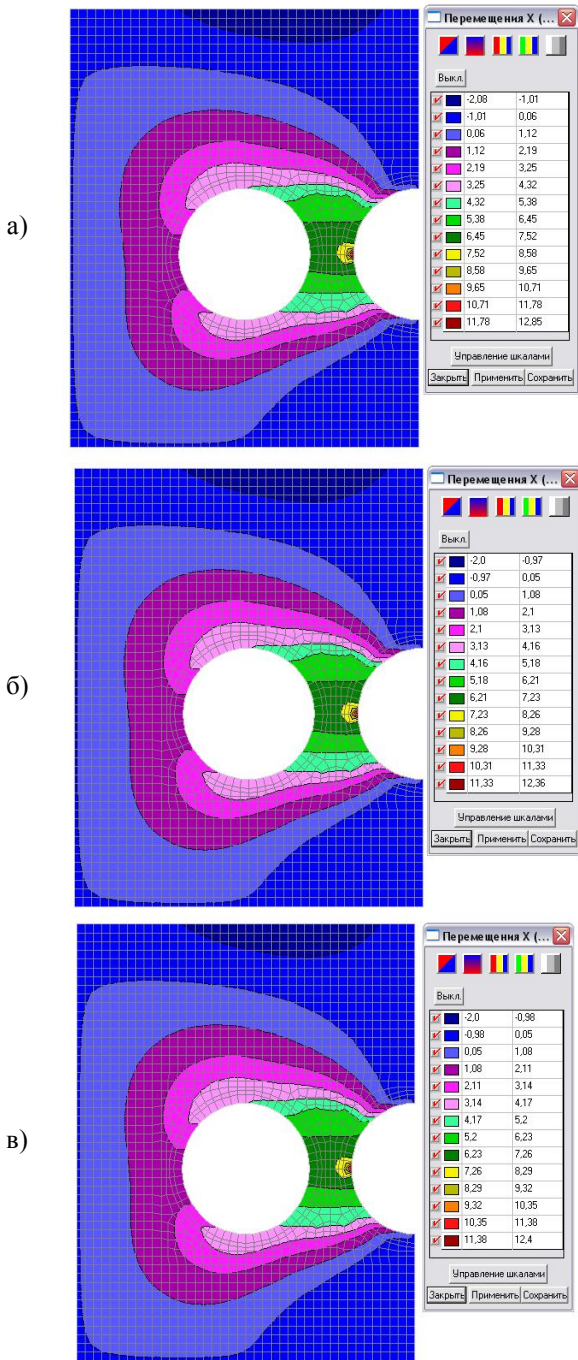


Рисунок 7 – Деформированное состояние модели – перемещения по вертикальной оси при значении импульсного воздействия: а) 5 кН·с; б) 10 кН·с; в) 15 кН·с

Максимальные значения вертикальных перемещений локализуются в сводовой и лотковой частях среднего тоннеля, характер деформирования свидетельствует об уменьшении сечения среднего тоннеля (свод смещается вниз, лоток – вверх). Значения вертикальных напряжений составляют 8...11 мм (по модулю). Зона разрушения пилона имеет вид эллипсоида. Следует отметить, что уменьшение напряже-

ний во втором и третьем вариантах при увеличении значения импульса вполне ожидаемо и объясняется увеличением времени действия импульса («растягивание» импульса во времени).

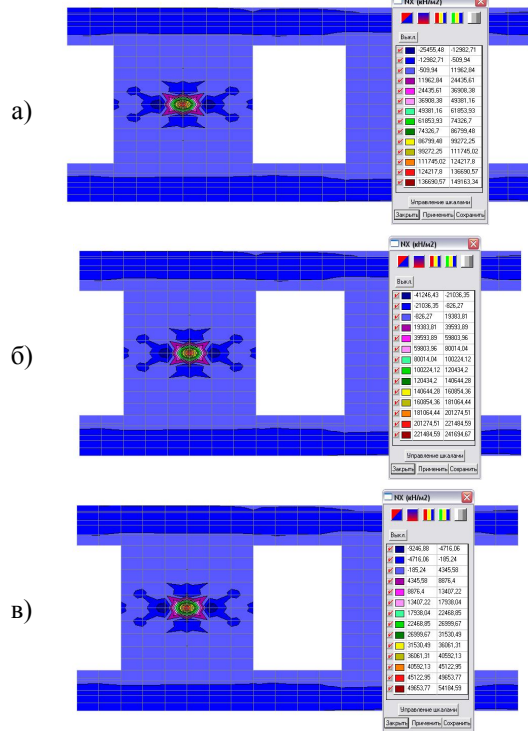


Рисунок 8 – Нормальные напряжения по горизонтальной оси в системе «пилон-проем» при значении импульса: а) 5 кН·с; б) 10 кН·с; в) 15 кН·с

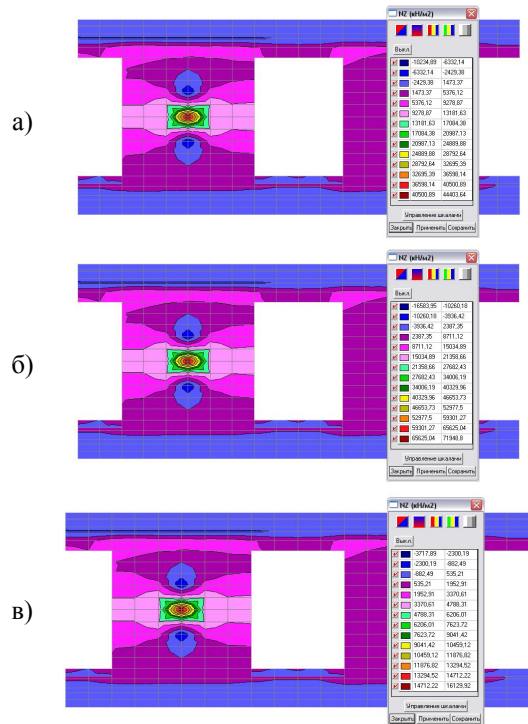


Рисунок 9 – Нормальные напряжения по вертикальной оси в системе «пилон-проем» при значении импульса: а) 5 кН·с; б) 10 кН·с; в) 15 кН·с

ВЫВОДЫ. После комплексного динамического анализа можно сделать следующие выводы.



1. Как видно из проанализированных результатов модального анализа во всех случаях характер колебаний низкочастотный (до 10 Гц), резонансных явлений не наблюдается.

2. Анализ напряженного состояния свидетельствует, что максимальные значения горизонтальных напряжений в зоне приложения импульса составляют +321,9 (1 вариант), +309,7 (2 вариант) и +310,8 МПа (3 вариант), характер напряжений – растягивающий, для вертикальных напряжений – +95,8 (1 вариант), +92,2 (2 вариант) и +92,5 МПа (3 вариант), характер напряжений – сжимающий. Это дает возможность утверждать, что в этой зоне происходит активное разрушение бетона.

3. Полученные результаты при исследовании импульсного воздействия свидетельствуют, что разрушение бетона пилона охватывает значительную зону и может привести дальнейшему прогрессирующему обрушению.

Данная работа была выполнена в рамках двух научно-исследовательских хозяйственных тем в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории механики грунтов Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петренко В.І., Петренко В.Д., Тютюкін О.Л.

Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – 176 с.

2. Sterling R. Underground space design. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. – 370 p.

3. Бакиров Р.О. Динамический расчет и оптимальное проектирование подземных сооружений. – М.: Стройиздат, 2002. – 464 с.

4. Юркевич П.Б. Геомеханические модели в современном строительстве // Подземное пространство мира. – № 1–2. – 1996. – С. 10–31.

5. Тютюкин А.Л. Анализ пространственной и плоских расчетных схем станции пилонного типа метрополитена глубокого заложения // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2001. – Вип. 2/2001 (11). – С. 337–340.

6. Петренко В.Д., Сєдін В.Л., Тютюкін О.Л., Старостенко І.В. Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану колонної станції метрополітену з двома видами колон // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – Вип. 6/2004 (29). – С. 108–112.

7. Hamid Chakeri, Rohola Hasanpour, Mehmet Ali Hindistan, Bahtiyar Anver. Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011. – Vol. 70, iss. 3. – PP. 439–448.

### COMPLEX DYNAMIC ANALYSIS OF A DEEP CONTOUR INTERVAL PYLON STATION OF THE SUBWAY

V. Petrenko, A. Tiutkin

Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan  
vul. Lazaryana, 2, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine. E-mail: tutkin@mail.ru

In the article results of complex dynamic analysis of the pylon station with determination of dynamic parameters (natural forms and frequencies) and stress-strain state at impulsive influence are resulted. Actuality of work consists in the problem decision of the combined determination of stresses, strains and dynamic descriptions of such elaborate tunnel constructions except deep contour interval pylon station of the subway. Material and results of researches is got on the basis of new finite-element models of the pylon station of deep contour interval, which allowed conducting the largest dynamic analysis which is part of complex analysis of tunnel constructions. The values of ten frequencies of free vibrations and results of influence of explosive impulsive internal constructions of the pylon station are expected. The results of modal and impulsive analyses of the pylon station which testify to their importance for this construction has been conclusions.

**Key words:** pylon station, complex analysis, natural forms, natural frequencies, stress-strain state

#### REFERENCES

1. Petrenko, V.I., Petrenko, V.D., and Tiutkin, O.L. (2004) *Rozrakhunok trysklepinchastykh stantsii metro-politenu hlybokoho zakladennia* [Calculation of the three-shield stations of deep contour interval], Science and education, Dnepropetrovsk, Ukraine.

2. Sterling, R. (1993) *Underground space design*, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.

3. Bakirov, R.O. (2002) *Dinamicheskiy raschet i optimalnoe proektirovanie podzemnykh sooruzheniy* [Dynamic calculation and optimum engineering of underground construction], Stroyizdat, Moscow, Russia.

4. Yurkevych, P.B. (1996) “Geomechanical model in modern building”, *Underground space of the world*, no. 1–2, pp. 10–31.

5. Tiutkin, A.L. (2001) “Analysis of spatial and flat calculation schemes of a deep contour interval pylon

station of the subway”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 2/2001 (11), pp. 337–340.

6. Petrenko, V.D., Sedin, V.L., Tiutkin, O.L. and Starostenko, I.V. (2004) “Comparative analysis of a stress-strain state of a column station of the subway with two kind of a column”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 6/2004 (29), pp. 108–112.

7. Hamid Chakeri, Rohola Hasanpour, Mehmet Ali Hindistan, Bahtiyar Anver (2011) “Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer Berlin Heidelberg, vol. 70, iss. 3, pp. 439–448.

Стаття надійшла 30.10.2014.