УДК 622.235.
535.2

**А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань**

# О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА ХАНОЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Рассмотрена оценка воздействия волн землетрясений на метрополитен Ханоя с сейсмической интенсивностью от 5 до 7 баллов по шкале Рихтера. Значение пикового ускорения движения грунта принимается равным $a_g = 0{,}2g$, а взаимодействие сейсмических волн с подземными сооружениями рассматривается при средней глубине залегания $H = 20$ м с эпицентром землетрясения на расстоянии 20÷50 км. Применены эффективные и широко апробированные аналитические и численные методы для определения напряженно-деформированного состояния модели «грунт-тоннельная обделка» метрополитена. Проведены исследование и оценка основных параметров напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя с учетом влияния сейсмических волн землетрясений.
Ключевые слова: сейсмические волны, землетрясение, тоннели, методы расчета, воздействие, численный метод, аналитический метод, напряжение.

В настоящее время система тоннелей метрополитена Ханоя разработана и практически построена. Метрополитен Ханоя представляет собой часть общественного наземного железнодорожного (трамвайного) транспорта. Транспортная система метрополитена состоит из двух частей: наземной и подземной. В части наземной есть 8 станций общей длиной 8,5 км, начиная со станции «Нхонь» и заканчивая станцией «Ким Ма». В части подземной есть 4 станции общей длиной 4 км, начиная со станции «Ким Ма» и заканчивая станцией «Ханоя» (рис. 1).

Вьетнам расположен на Евразийской плите вблизи границы плиты Суматра-Андаман-Мьянма. Территорию Северного Вьетнама пересекает много тектонических разломов. Самым

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 244–252.
© 2017. А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань.

активным разломом, генерирующим землетрясения с максимальной интенсивностью от 8 до 9 баллов (по российской шкале MSK-64), является разлом «Лай Чау – Дьен Бьен – Шонг Ма – Шон Ла» [2]. Этот разлом расположен в северо-западной части Вьетнама. В 1983 г. в северо-западной части города Ханоя произошло большое количество землетрясений с сейсмической интенсивностью от 5 до 8 баллов. В результате землетрясений незначительно были повреждены некоторые здания и сооружения. Тем не менее, эти землетрясения вызвали неприятные ощущения и беспокойство у многих людей. При этом следует отметить особенность сейсмических воздействий на город Ханой: интенсивность землетрясений на поверхности значительно возрастала из-за резонансного усиления амплитуды колебаний в верхних мягких глинистых слоях (глубиной до 50 м).

Из научных публикаций известно [2], что воздействие сейсмических волн на различные сооружения определяется следующими основными моментами: источник землетрясений характеризуется типичными параметрами, такими как максимальная амплитуда волн, средняя глубина источника землетрясений и скорость волн землетрясений; существенное затухание колебаний с увеличением расстояния от источника землетрясений. На основе натурных исследований и проведенных расчетов в работе получены данные об опасных уровнях сейсмической интенсивности землетрясений для территории города Ханоя, в частности, и Вьетнама в целом. Необходимые данные и характеристики для расчетов приведены в табл. 1 и 2.

На основе данных натурных замеров [1] в работе учтено, что волны землетрясений воздействовали на город Ханой с сейсмической интенсивностью от 5 до 7 баллов по шкале Рихтера (по российской шкале MSK-64 от 5 до 8 баллов). При этом пиковое ускорение грунта оценивалось как $a_g = 0{,}2g$.

Основные характеристики обделок тоннелей [3]. Сечение тоннеля метрополитена Ханоя является круглым, диаметром $D = 6{,}3$ м, оболочка метрополитена Ханоя – железобетонная;

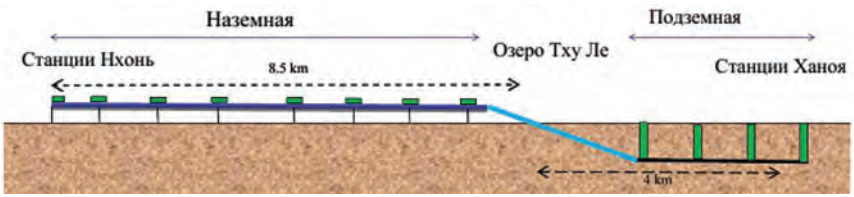


*Рис. 1. Общий план маршрутов и станций [3]*

Таблица 1

***Упругие характеристики и скорости сейсмических волн в слоях [1]***

| Номер слоя | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Мощность слоя $h_i$, м | 4,6 | 1,1 | 11,8 | 12,5 | 11 | 7 |
| Плотность грунта $\rho_i$, кг/м$^3$ | 1750 | 1760 | 1810 | 1780 | 1830 | 1860 |
| Модуль деформации упругости $E$, МПа | 9,25 | 7,68 | 15,3 | 35,02 | 53,9 | 65 |
| Коэффициент Пуассона $\nu$ | 0,41 | 0,38 | 0,35 | 0,33 | 0,32 | 0,3 |
| Скорость волны сдвига $i$ – $C_{Si}$, м/с | 43,29 | 39,76 | 55,95 | 86 | 105,63 | 115,93 |
| Скорость продольной волны $i$ – $C_{Pi}$, м/с | 110,85 | 90,38 | 116,48 | 170,73 | 205,30 | 216,89 |

Таблица 2

***Расчетные параметры [1]***

| Номер слоя | Параметры | Значение |
|---|---|---|
| 1 | Средний модуль упругости слоев грунта $E^c_m$, МПа | 35,75 |
| 2 | Средний коэффициент Пуассона слоев грунта $\nu^c_z$ | 0,34 |
| 3 | Пиковая скорость поверхности грунта $V_S$, м/с | 0,1848 |
| 4 | Скорость распространения волн в грунте $C_S(d)$, м/с | 73,32 |
| 5 | Эффективная скорость распространения волн в грунте $C_{Se}$, м/с | 51,32 |
| 6 | Скорость распространения волн в грунте $C_P(d)$, м/с | 152,84 |

глубина тоннеля $H$ равна 10÷20 м. Тип крепи для тоннелей метрополитена Ханоя – это обделки из сборных железобетонных блоков; поперечное сечение обделки тоннеля является круглым; модуль упругости материала обделки $E_1$ = 36 750 МПа, коэффициент Пуассона $\nu_2$ = 0,1515; толщина обделки $t$ = 0,35 м.

Аналитические решения в замкнутой форме для оценки взаимодействия круговых тоннелей с грунтом при сейсмических воздействиях были получены исследователем Wang [5]. Эти решения получены с учетом следующих предположений:

- грунт – бесконечная, упругая, однородная и изотропная среда;
- цилиндрическая тоннельная обделка представляет собой тонкостенную оболочку в рамках плоской деформации;
- происходит проскальзывание или отсутствие проскальзывания на границе грунта и тоннельной обделки [5].

Расчет реакций тоннельных обделок на нагрузку производится с использованием функций передачи напряжений при

сжатии и изгибе. При этом выражения для максимального обжатия тоннельной обделки $T_{max}$, максимального изгибающего момента $M_{max}$ и деформации диаметра $\Delta D/D$ могут быть рассчитаны в следующих случаях:

• для определения максимального изгибающего момента учитывается полное проскальзывание тоннельной обделки относительно окружающего ее грунта;

• для определения максимальной продольной силы в обделке учитываются силы сцепления, т.е. отсутствие полного про-

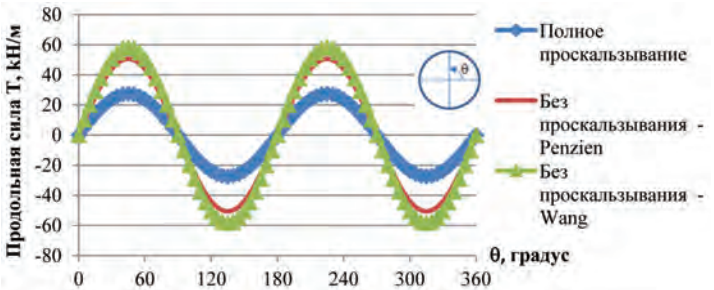


*Рис. 2. Графическая зависимость продольной силы T, кН/м*

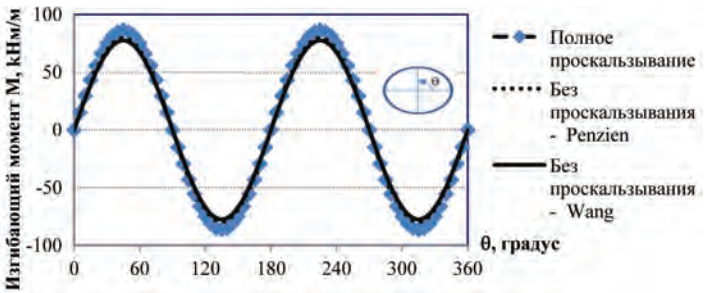


*Рис. 3. Графическая зависимость изгибающего момента M, кНм/м*

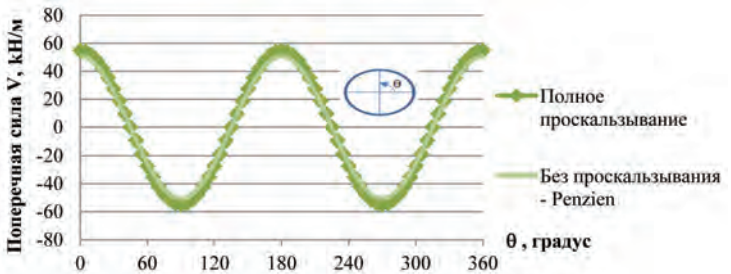


*Рис. 4. Графическая зависимость поперечной силы V, кН/м*

скальзывания тоннельной обделки относительно окружающего ее грунта.

Отметим, что в настоящее время применяются два эффективных расчетных способа при проектировании цилиндрических тоннелей Wang и Penzien [4, 5], которые позволяют выполнять аналитические расчеты с учетом полного проскальзывания и без проскальзывания тоннельной обделки относительно окружающего ее массива грунта.

Базируясь на методах Wang и Penzien [4,5], можно произвести расчет овализации поперечных сечений цилиндрической тоннельной обделки в рамках рассматриваемой модели «грунт – тоннельная обделка». Методы Wang и Penzien также использовались для определения максимального обжатия тоннельной обделки $T_{max}$, максимального изгибающего момента $M_{max}$ и деформации диаметра $\Delta D/D$ с учетом того, что происходит полное проскальзывание тоннельной обделки относительно окружающего ее грунта и с учетом сил сцепления.

Результаты численных расчетов изгибающих моментов, поперечных и продольных сил в тоннельных обделках приведены на рис. 2–4.

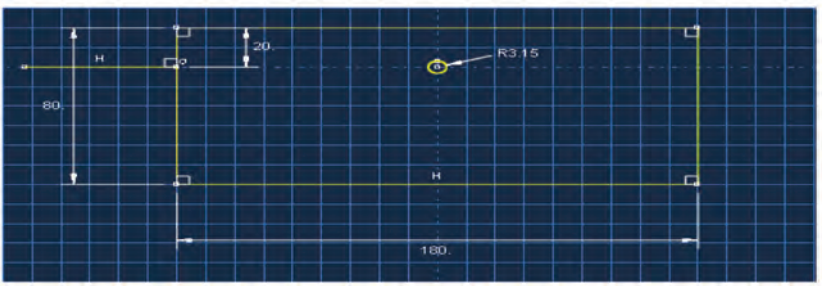


*Рис. 5. Геометрическая модель тоннеля*

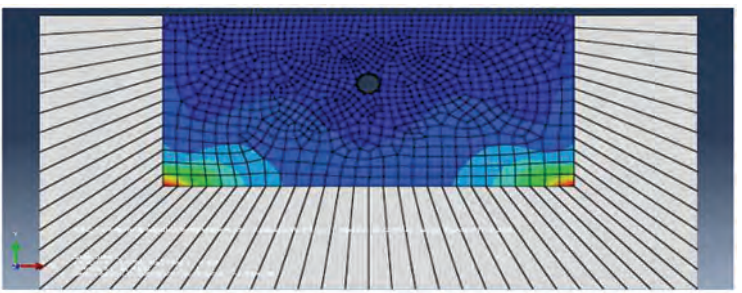

*Рис. 6. Конечно-элементная модель тоннеля метрополитена Ханоя*

Таблица 3

| № | Метод расчета | Рассматриваемый случай | $M_{max}$, кНм | $T_{max}$, кН | $V_{max}$, кН | $\sigma_{max}$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Wang | полное проскальзывание | 86,36 | 27,42 | 54,83 | 4,308 |
| | | без проскальзывания | 77,50 | 58,43 | – | 3,963 |
| 2 | Penzien | полное проскальзывание | 86,36 | 27,42 | 54,83 | 4,308 |
| | | без проскальзывания | 79,73 | 50,62 | 50,62 | 4,050 |

Максимальное нормальное напряжение при изгибе и при сжатии вдоль оси тоннеля определяется выражением:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}t}{2I} + \frac{T_{max}}{A_l} = \frac{86,36 \cdot 0,175}{0,00357} + \frac{27,42}{0,35} = 4308,17 \text{ кН/м}^2 =$$

$$= 4,308 \text{ МПа} < [\sigma]_в = 22 \text{ МПа}. \quad (1)$$

где $t$ – толщина обделки, $t = 0,35$ м; $I_s = 1/12d^3t$ – момент инерции тоннельной обделки (на единицу погонной длины обделки), $I_s = 0,00357$ м$^4$/м; $A_l$ – площадь поперечного сечения обделки(на единицу погонной длины обделки), $A_l = 0,35$ м$^2$.

В табл. 3 приведены максимальные значения внутренних усилий в обделке тоннелей метрополитена Ханоя.

В данной статье авторы также использовали программу Abaqus для численного расчета основных параметров напряженного состояния в рамках рассматриваемой модели «грунт-обделка» тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн с характеристиками, приведенными в табл. 1 и 2. Получены результаты для следующих характеристик грунта [1]: модуль упругости грунта $E = 35,75$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,34$; глубина тоннеля $H = 20$ м. Характеристики обделки тоннеля: модуль упругости тоннельной обделки $E_{td} = 36\,750$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu_2 = 0,1515$; толщина обделки $t = 0,35$ м.

Геометрическая модель тоннеля изображена с характерными размерами на рис. 5, а на рис. 6 приведена разработанная конечно-элементная модель для численного расчета по программе Abaqus. Для исключения фактора отражения волн от границ массива грунта последний моделируется бесконечной областью.

На рис. 7–12 приведены результаты численных расчетов, выполненных с учетом параметров и характеристик (табл. 1, 2) тоннелей метрополитена Ханоя, методом конечных элементов по программе Abaqus: максимальные горизонтальные перемещения на обделке – $6 \cdot 10^{-3}$ м; максимальные вертикальные перемещения в обделке – $2 \cdot 10^{-6}$ м; максимальные нормальные напряжения

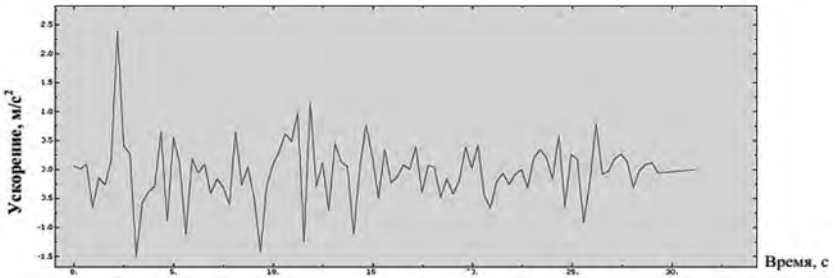


*Рис. 7. График ускорений на границах слоев*

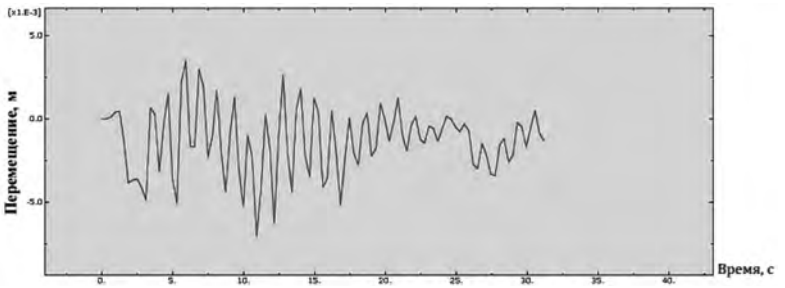


*Рис. 8. График горизонтальных перемещений слоев*

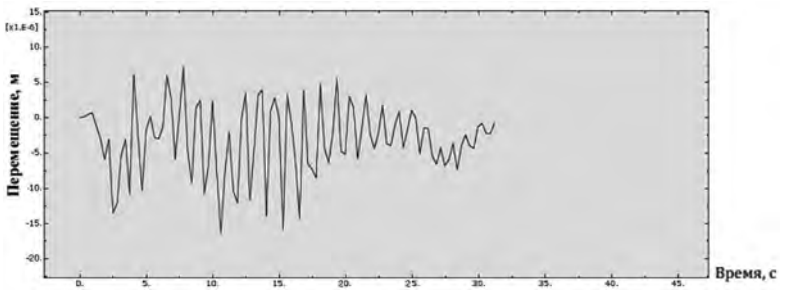


*Рис. 9. График вертикальных перемещений слоев*

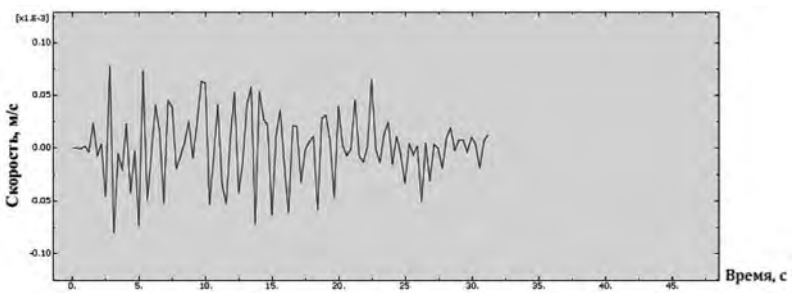


*Рис. 10. График вертикальных скоростей на границах слоев*

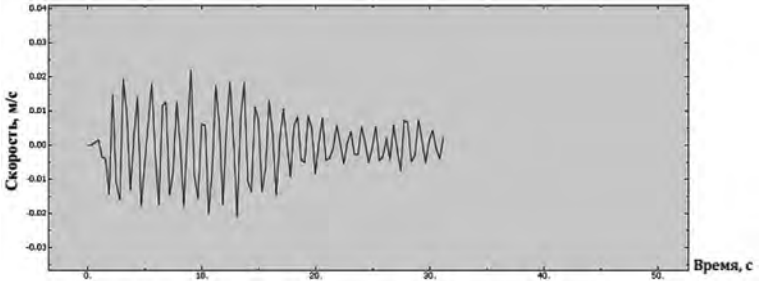


*Рис. 11. График горизонтальных скоростей на границах слоев*

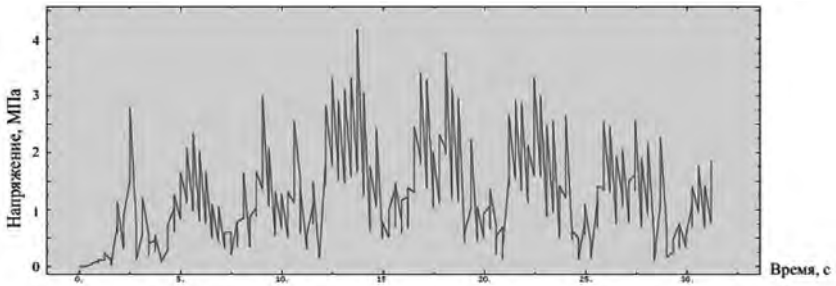


*Рис. 12. График нормальных напряжений*

в обделке – 4,06 МПа; максимальные горизонтальные скорости на границах слоев – $2 \cdot 10^{-2}$ м/с; максимальные вертикальные скорости на границах слоев – $8 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Сравнивая результаты расчета, полученные аналитическими методами [4, 5], с результатами, полученными численным методом, отметим незначительное отличие результатов. Максимальное нормальное напряжение при изгибе и при сжатии вдоль оси тоннеля определяется значением (методы Wang и Penzien) $\sigma_{max} = 4{,}308$ МПа, максимальное нормальное напряжение на обделке тоннелей (численный метод) $\sigma_{max} = 4{,}06$ МПа. Погрешность в пределах 10%. Отметим, что по результатам, полученным по программе Abaqus, можно сделать вывод: максимальные значения внутренних усилий в тоннельной обделке метрополитена Ханоя меньше нормативного предела значения внутренних усилий тоннельной обделки. Таким образом, обделка устойчива и выдерживает нагрузки от заданной интенсивности сейсмического воздействия землетрясений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Господариков А. П., Нгуен Чи Тхань.* Исследования основных параметров сейсмических волн землетрясений в области Вьетнама и Ханоя //

Журнал горнодобывающей промышленности и промышленности Вьетнама. – 2016. – № 4. – С. 61–65.
2. *Май Дык Минь*. Расчет тоннелей на сейсмические воздействия. Диссертация на соискание уч. ст. канд. техн. наук. – М., 2014. – 124 с.
3. *Ban* QLDA trong diem Ha Noi. Thuyet minh du an metro Ha Noi, 2014.
4. *Penzien J., Wu C.* Stresses in linings of bored tunnels // Journal of Earthquake Eng. Structural Dynamics 27, 1998. – pp. 283–300.
5. *Wang J.* Seismic design of tunnels. Monograph 7, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc, New York, June 1993. ГИАБ

**КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Господариков Александр Петрович*[1] – доктор технических наук, профессор,
*Нгуен Чи Тхань*[1] – аспирант, e-mail: nguyenthanh.xdctn47@gmail.com,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 6, pp. 244–252.

UDC 622.235.
535.2

**A.P. Gospodarikov, Nguyen Chi Thanh**

# SOME APPROACHES DETERMINE THE STRESS STATE OF LINING OF UNDERGROUND TUNNELS OF HANOI TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE OF SEISMIC WAVES OF EARTHQUAKES

Currently, the system of underground tunnels of Hanoi developed and practically built. This paper considers the assessment of the impact of waves of earthquakes on underground of Hanoi with seismic intensity of 5 to 7 points on the Richter scale (according to the Russian scale MSK-64 from 5 to 8 points). The peak acceleration of ground motion is taken equal to ag = 0.2g, and the interaction of seismic waves with underground structures is considered with an average depth of H = 20 m with the epicenter at a distance of 20÷50 km. In this paper we use an effective and widely proven analytical and numerical methods for determining stress-strain state of the model «soil – tunnel lining» of the metro. Thus, the research and evaluation of the main parameters of the stress state of the lining of underground tunnels of Hanoi taking into account the influence of seismic waves of earthquakes is the main task of this article.

Key words: seismic waves, earthquake, tunnels, methods of calculation, influence, numerical method, analytical method, stress.

**AUTHORS**

*Gospodarikov A.P.*[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
*Nguyen Chi Thanh*[1], Graduate Student, e-mail: nguyenthanh.xdctn47@gmail.com,
[1] Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

**REFERENCES**

1. Gospodarikov A. P., Nguen Chi Thanh. *Zhurnal gornodobyvayushchey promyshlennosti i promyshlennosti V'etnama*. 2016, no 4, pp. 61–65.
2. May Dyk Min'. *Raschet tonneley na seysmicheskie vozdeystviya* (Calculation of tunnels under effect seismic waves earthquake), Candidate's thesis, Moscow, 2014, 124 p.
3. *Ban QLDA trong diem Ha Noi. Thuyet minh du an metro Ha Noi*. 2014.
4. Penzien J., Wu C. Stresses in linings of bored tunnels. *Journal of Earthquake Eng. Structural Dynamics* 27, 1998. pp. 283–300.
5. Wang J. *Seismic design of tunnels*. Monograph 7, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc, New York, June 1993.