

На правах рукописи

Нгуен Чи Тхань



**МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА ХАНОЯ ПОД
ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная
теплофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт–Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Господариков Александр Петрович

Официальные оппоненты:

Ледяев Александр Петрович,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Тоннели и метрополитены», заведующий кафедрой

Трофимов Андрей Викторович,

кандидат технических наук, ООО «Институт Гипроникель», центр физико-механических исследований горных пород и материалов, заведующий центром

Ведущая организация – Открытое акционерное общество Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс»

Защита диссертации состоится 27 сентября 2019 г. в 15 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 июля 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ДЕМЕНКОВ
Петр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В настоящее время система тоннелей метрополитена Ханоя (Вьетнам) спроектирована и построена. Однако, имеющийся опыт эксплуатации других метрополитенов показывает, что для обеспечения их надежности и безопасности необходимо учитывать влияние сейсмических волн, так как тоннели метрополитена Ханоя расположены в зоне, подверженной землетрясениям. Поэтому результаты натурных замеров и численного моделирования воздействия сейсмических волн землетрясений на подземные сооружения являются основой для разработки рекомендаций по обоснованию типа и выбора параметров обделок тоннелей метрополитена Ханоя.

Значительный вклад в исследование процесса деформирования и разрушения горных пород вокруг подземных сооружений внесли Баклашов И.В., Бульчев Н.С., Огородников Ю.Н., Руппенейт К.В., Тимофеев О.В., Трушко В.Л., Безродный К.П., Ледяев А.П., Лебедев М.О., Во Чонг Хунг, Нгуен Куанг Фич, Нгьем Хыу Хань и др.

Исследованием воздействия динамических нагрузок, сейсмической активности, вызванной землетрясениями, на напряженное состояние обделок тоннелей метрополитена, занимались как отечественные ученые Протосеня А.Г., Фотиева Н.Н., Козырев А.А., Эквист Б.В., Господариков А.П., так и зарубежные ученые Wang J., Penzien J., Naggar H.E., Hinchberger S.D., Newmark N.M., John C.M.St., Wu C., Zahrah T.F., Power M.S., Rosidi D. и др.

Цель диссертационной работы: обеспечение прочности крепи (обделок) тоннелей метрополитена Ханоя при активном сейсмическом воздействии волн землетрясений на вмещающий их грунтовый массив.

Идея работы: оценку воздействия сейсмических волн землетрясений на тоннели метрополитена необходимо производить на основе разработанного численно-аналитического метода расчета основных параметров напряженно-деформированного состояния

обделок тоннелей метрополитена Ханоя для обоснования типа и выбора параметров крепи (обделок).

Основные задачи и методы исследований:

- анализ и обоснование оценок воздействия сейсмических волн землетрясений на тоннели метрополитена;
- анализ основных характеристик тоннелей метрополитена Ханоя;
- разработка и обоснование численно-аналитического метода расчета воздействия волн землетрясений на тоннели метрополитена Ханоя;
- обоснование типа (общая нагрузка представляется в виде суммы статистической и динамической составляющих) и выбор параметров крепи (обделок) тоннелей метрополитена Ханоя на основе результатов численно-аналитического моделирования;
- практические рекомендации по выбору типа и параметров обделок тоннелей метрополитена Ханоя;
- оценка инженерно-геологических условий залегания тоннелей метрополитена Ханоя;
- определение основных параметров напряженно-деформированного состояния поперечных сечений обделок тоннелей метрополитена Ханоя численными методами.

Научная новизна работы:

1. Разработана и обоснована геомеханическая модель воздействия сейсмических волн землетрясений на неоднородный массив горных пород, вмещающий тоннели метрополитена Ханоя с учетом геологических условий их залегания.
2. Установлены закономерности изменения основных параметров напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя при воздействии сейсмических волн землетрясений.

Защищаемые научные положения:

1. Оценку воздействия сейсмических волн землетрясений на тоннели метрополитена Ханоя необходимо производить на основе разработанного численно-аналитического метода в рамках обоснованного квазистатистического подхода, учитывающего как

параметры волн землетрясений и обделок тоннелей, так и геологические условия их залегания.

2. При расчете основных параметров напряженного состояния в поперечных сечениях обделок тоннелей метрополитена Ханоя при воздействии сейсмических волн землетрясений необходимо учитывать влияние стыков в обделках тоннелей.

3. Обоснование типа и выбор параметров обделок тоннелей метрополитена Ханоя необходимо производить на основе результатов численного моделирования, учитывающего взаимодействие обделок тоннелей с грунтом (в рамках упругого основания Винклера с двумя коэффициентами постели).

Практическая значимость работы:

- разработан численно-аналитический метод учета геологических условий при воздействии сейсмических волн землетрясений в зоне залегания тоннелей метрополитена Ханоя;

- получены практические рекомендации по обоснованию типа и выбора параметров крепи (обделок) тоннелей метрополитена Ханоя.

Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций подтверждаются результатами применения эффективного численного метода решения геомеханических задач – метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе SIMULIA ABAQUS, а также результатами, полученными с применением разработанных численно-аналитических методов, и их удовлетворительной согласованностью с данными натурных замеров.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований; в разработке расчетных конечно-элементных моделей; в проведении численных экспериментов и анализе полученных результатов; в анализе натурных данных деформирования грунта вокруг тоннелей; в обосновании выбора типа и параметров крепи (обделок) тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений; в разработке рекомендаций по обеспечению прочности обделок тоннелей под воздействием сейсмических волн землетрясений.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на заседаниях кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений и на заседаниях научно-технического совета по работе с аспирантами Горного университета; на Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений (СПб., 2017); на IV Международной научно-методической конференции «Современные образовательные технологии в преподавании естественно-научных и гуманитарных дисциплин» (СПб., 2017); на VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий (СПб., 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 3 работы – в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России, 8 – в изданиях, индексируемых международной научной базой цитирования Scopus и Web of Science.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 161 страницах машинописного текста, содержит 4 главы, введение, заключение, приложение, список использованной литературы, состоящий из 108 наименований, 55 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 изложен краткий обзор подземных сооружений (метрополитенов) мира, типы сейсмических волн и их воздействие на тоннели метрополитена; представлены генеральный план транспортной системы Ханоя, особенности системы метрополитена Ханоя и характеристики сейсмических волн землетрясения 1983 года.

В главе 2 разработаны методы расчета основных параметров напряженного состояния в поперечных сечениях обделок тоннелей метрополитена при воздействии на них сейсмических волн землетрясений для следующих случаев:

- поперечное сечение обделки тоннеля метрополитена представляет собой монолитное, однородное, упругое и неповрежденное кольцо;

- обделка тоннелей метрополитена является сегментной обделкой, в которой имеются стыки (сопряжения между элементами сборной обделки).

Приводятся основные методы расчета основных параметров напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена под воздействием сейсмических волн землетрясений, направленных вдоль оси тоннеля для следующих случаев:

- при равенстве деформаций обделки тоннеля с деформациями «свободного поля»;

- при учете значений деформаций на контакте тоннельной обделки и массива грунта;

- при учете эффекта взаимодействия обделки тоннеля с грунтом, характеризующимся двумя коэффициентами постели (в рамках упругого основания Винклера).

В главе 3 приведены геологические условия зоны расположения метрополитена Ханоя и сейсмические данные по землетрясениям во Вьетнаме, а также рассчитаны характеристики сейсмических волн землетрясений при их распространении в грунте или породном массиве; обосновано значение магнитуды сейсмического воздействия на тоннели метрополитена Ханоя; разработан метод расчета максимального ускорения грунта, вмещающего тоннели метрополитена; получены формулы расчёта усредненных значений характеристик грунта в зоне залегания метрополитена Ханоя.

В главе 4 диссертации представлены структура и характеристики тоннелей системы метрополитена Ханоя. На основе разработанных методов расчета обоснован тип и выбор параметров обделок для тоннелей метрополитена с учетом воздействия сейсмических волн землетрясений; произведен учет геологических условий зоны залегания тоннелей метрополитена Ханоя; приведены результаты компьютерного моделирования рассматриваемых задач с помощью программного комплекса SIMULIA ABAQUS;

сопоставлены результаты с результатами, полученными с помощью других методов расчета.

В заключении приведены основные выводы и рекомендации, полученные по результатам проведенных исследований.

В приложении приведены результаты численных расчетов.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.т.н. профессору А.П. Господарикову за помощь в постановке и проведении исследований по теме диссертации.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Оценку воздействия сейсмических волн землетрясений на тоннели метрополитена Ханоя необходимо производить на основе разработанного численно-аналитического метода в рамках обоснованного квазистатистического подхода, учитывающего как параметры волн землетрясений и обделок тоннелей, так и геологические условия их залегания.

Территория Вьетнама находится на Евразийской тектонической плите, при этом большая часть государства – около границы плиты Суматра-Андаман-Мьянма. По территории Северного Вьетнама проходит несколько тектонических разломов. Большую опасность представляет разлом «Лай Чау - Дьен Бьен - Шонг Ма - Шон Ла», вызывающий землетрясения с наибольшей интенсивностью – от 8 до 9 баллов (по российской шкале MSK-64). Этот разлом расположен в северо-западной части Вьетнама; самый активный период его деятельности – начало 1980-х годов, в то время в столице Вьетнама было зафиксировано множество возмущений земной коры силой от 5 до 8 баллов. Но последствия такой сейсмической активности не были катастрофическими: ущерб исчислялся повреждением небольшого числа зданий и сооружений. Несмотря на это, жители и администрация Ханоя выразили беспокойство по этому поводу и необходимость изучения сейсмической активности. Также нужно упомянуть об особенностях строения земной коры в области Ханоя: интенсивность землетрясений на поверхности значительно возросла из-за

резонансного усиления амплитуды колебаний в верхних мягких глинистых слоях (глубиной до 50 м).

Влияние сейсмических волн на здания и сооружения зависит от множества факторов, выделим два главных: 1) источник землетрясения и его основные характеристики: максимальный масштаб, средняя глубина землетрясения и скорость землетрясения; 2) затухание колебаний с увеличением расстояния. Следовательно, из имеющихся натуральных замеров (землетрясение 1983 года) и по результатам исследовательских работ сделаны схемы и расчёты, учитывающие локации эпицентров, масштабы распространения волн и силу землетрясений и позволяющие оценить уровень опасности для столицы Ханоя и всего Вьетнама. Воздействие сейсмических волн в районе Ханоя лежит в диапазоне от 5 до 7 баллов по шкале Рихтера, или от 5 до 8 баллов по российской шкале MSK-64.

Зона залегания тоннелей метрополитена Ханоя представляет собой неоднородную слоистую среду. В работе неоднородная слоистая среда заменяется эквивалентным однородным слоем. Тогда приближенно скорость сейсмической волны сдвига равна:

$$C_s(d) = \frac{d}{\sum_1^n \frac{h_i}{C_{Si}}}, \quad (1)$$

где d – общая мощность слоев грунта, м; h_i – мощность i -го слоя, м; C_{Si} – скорость волны сдвига i -го слоя, м/с; n – общее число слоев грунта. Формула для расчёта среднего значения модуля упругости грунта имеет вид:

$$E = \frac{1}{d} \sum_1^n E_i h_i, \quad (2)$$

где E_i – модуль упругости i -го слоя, МПа; h_i – мощность i -го слоя, м; d – общая мощность слоев грунта, м.

Применение формул (1) и (2) приводит к численным значениям используемых величин, представленным в таблице 1.

Четвертичные отложения на территории Ханоя (главная геологическая среда Ханоя) являются типичными инженерно-

геологическими условиями Ханоя, а именно – это мягкий грунт (глубины от 0 до 50 метров). В предыдущем разделе было показано, что воздействие сейсмических волн в районе Ханоя лежит в диапазоне от 5 до 7 баллов по шкале Рихтера, или от 5 до 8 баллов по российской шкале MSK-64. Значение максимального ускорения движения грунта рекомендуется принимать равным $a_g=0.2g$ с эпицентром источника землетрясений на расстоянии 20÷50 км.

Таблица 1– Результаты расчета параметров грунта и волн

Параметры волн и грунта	Значение	Единица
Средний модуль упругости слоев грунта E_z^c	35.75	МПа
Средний коэффициент Пуассона слоев грунта ν_z^c	0.34	-
Пиковая скорость поверхности грунта V_S	0.1184	м/с
Скорость распространения поперечных волн в грунте $C_S(d)$	73.32	м/с
Эффективная скорость распространения поперечных волн в грунте C_{Se}	51.32	м/с
Скорость распространения продольных волн в грунте $C_P(d)$	152.84	м/с

По мнению проф. В.Л. Трушко и проф. А.Г. Протосени, когда есть результаты расчетов концентраций динамических напряжений вокруг тоннеля, показывающих, что при соотношении $L/2R>3$, (L – длина поперечной волны; R – радиус тоннеля) может быть использовано квазистатическое решение задачи. В этой связи в диссертации со значениями горизонтальной длины волны $L=200$ м, диаметр тоннеля $2R = 6,3$ м и соотношений $L/2R=31>3$, может быть использовано квазистатическое решение задачи.

2. При расчете основных параметров напряженного состояния в поперечных сечениях обделок тоннелей метрополитена Ханоя при воздействии сейсмических волн землетрясений необходимо учитывать влияние стыков в обделках тоннелей.

В настоящее время метод HRM (Hyperstatic reaction method) является одним из эффективных методов расчета основных параметров напряженного состояния обделок тоннеля при учете стыков (Do N.A., 2014). В методе HRM обделки тоннеля разделены на сегменты (балки-элементы) с учетом влияния стыков между сегментами обделки (кольца). Взаимосвязь между параметрами напряженного состояния каждого сегмента обделки, рассчитанными в локальной системе координат, устанавливается с помощью перехода к глобальной системе координат. Определение значений неизвестных перемещений обделок тоннеля производится на основе формирования глобальной матрицы жесткости всей рассматриваемой конструкции и стыков с учетом влияния окружающей среды (грунта). Следовательно, глобальная матрица жесткости в работе получена с учетом локальных матриц жесткости каждого отдельного сегмента кольца (балки-элемента) рассматриваемой конструкции. Расчетная схема используемого в работе метода HRM представлена на рисунке 1.

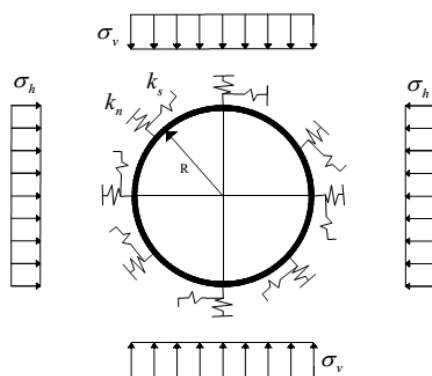


Рисунок 1 – Расчетная схема метода HRM: R – радиус обделки тоннеля; k_n – коэффициент нормальной жесткости пружин; k_s – коэффициент касательной жесткости пружин; σ_v – вертикальное напряжение; σ_h – горизонтальное напряжение

В методе HRM взаимодействие сегментных частей обделки производится по полужесткому соединению (главной

характеристикой полужесткого соединения является непрерывное изменение жесткости под действием нагрузок).

В работе (Burns S.A. и др., 2002) был введен так называемый "фактор неподвижности" для учета относительной жесткости балки-элемента и вращательной жесткости пружины. "Фактор неподвижности" широко используется на практике, например: для полужесткого соединения конечного числа балки-элементов он определяется по следующей формуле:

$$r_i = \frac{1}{1 + \frac{3E_s J_s}{K_{RO} L_i}}, \quad (3)$$

где K_{RO} – вращательная жесткость пружины концевое соединения; E_s – модуль Юнга материала; J_s – момент инерции балки-элемента; L_i – длина i -го балки-элемента (рисунок 2).

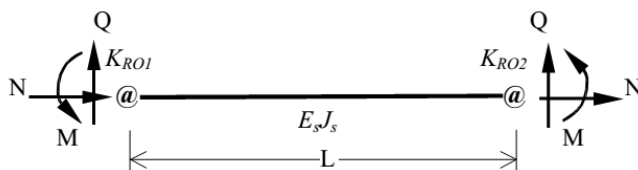


Рисунок 2 – Расчетная схема балки-элемента (Burns S.A. и др., 2002)

Таким образом, "фактор неподвижности" r_i определяется значением вращательной жесткости каждого концевое соединения: для шарнирного соединения "фактор неподвижности" равен нулю ($r=0$); для полностью жесткого соединения "фактор неподвижности" равен единице ($r=1$). Следовательно, для полужесткого соединения значение "фактора неподвижности" принадлежит интервалу ($0 < r < 1$).

Матрица жесткости i -го балки-элемента с двумя полужесткими концевыми соединениями и значениями вращательной жесткости K_{RO1} и K_{RO2} представлена формулой (4):

$$C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4r_2 - 2r_1 + r_1r_2}{4 - r_1r_2} & \frac{-2L_1r_1(1 - r_2)}{4 - r_1r_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6(r_1 - r_2)}{L_1(4 - r_1r_2)} & \frac{3r_1(2 - r_2)}{4 - r_1r_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4r_1 - 2r_2 + r_1r_2}{4 - r_1r_2} & \frac{2L_1r_2(1 - r_1)}{4 - r_1r_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6(r_1 - r_2)}{L_1(4 - r_1r_2)} & \frac{3r_2(2 - r_1)}{4 - r_1r_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Матрица жесткости i -го балки-элемента при наличии жестких концевых соединений может быть преобразована с помощью матрицы коррекции (Burns S.A. и др., 2002) по формуле:

$$K_i^{SR} = Z_i C_i, \quad (5)$$

где K_i^{SR} – матрица жесткости i -го балки-элемента с учетом полужестких концевых соединений; Z_i – матрица жесткости i -го балки-элемента с полностью жесткими конечными соединениями; C_i – коррекционная матрица.

При нелинейном поведении полужесткого концевого соединения необходимо организовать итерационную процедуру: матрица жесткости i -го балки-элемента K_i^{SR} изменяется при каждой итерации с помощью матрицы коррекции C_i с обновленным "фактором неподвижности" r_i .

В работе напряжение сдвига оценивалось по формуле:

$$\tau = G\gamma_c, \quad (6)$$

где G – модуль сдвига грунта, МПа; γ_c – деформация сдвига, %.

Данная работа, описывая применение метода HRM, предполагает соединение между собой балок-элементов с помощью узлов. При этом сейсмические волновые нагрузки на сжатие

приложены вдоль направления балки, а на растяжение – в перпендикулярном направлении. Вследствие этого результирующие нагрузки, возникающие от сдвиговых напряжений, могут различаться в предложенном методе HRM и расчётной методике Naggar Н.Е. На основе используемой схемы действия сейсмических нагрузок на обделку тоннеля в методе HRM (рисунок 3) горизонтальные нагрузки действуют в противоположных направлениях, а все внешние нагрузки поворачиваются против часовой стрелки на угол, равный $\frac{\pi}{4}$. Параметры **a** и **b**, представленные на рисунке 3, были

введены для учета внешних нагрузок при сейсмическом воздействии при реализации метода HRM.

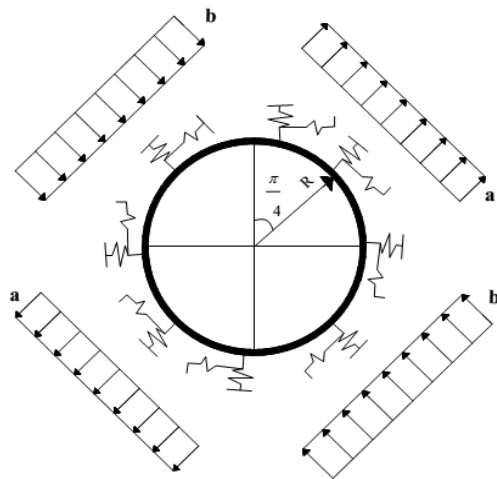


Рисунок 3 – Параметры **a** и **b** внешних сил для учета сейсмического воздействия метода HRM

Анализ расчетов значений параметров **a** и **b**, учитывающих внешние нагрузки, вызванные при сейсмическом воздействии напряжениями сдвига τ , привел к следующим результатам: параметр **b** равен 1.25τ ; параметр **a** зависит от радиуса R тоннеля и оценивается следующим выражением:

$$\mathbf{a} = (-0.7\ln(R) + 0.885)\tau . \quad (7)$$

3. Обоснование типа и выбор параметров обделок тоннелей метрополитена Ханоя необходимо производить на основе результатов численного моделирования, учитывающего взаимодействие обделок тоннелей с грунтом (в рамках упругого основания Винклера с двумя коэффициентами постели).

В настоящее время имеется много типов обделок для тоннелей метрополитена, учитывающих время, методы и технологии ведения строительства тоннелей, свойства грунтов залегания тоннелей при сейсмических воздействиях и т.д. Тип обделок для тоннелей метрополитена Ханоя – это сборные обделки из железобетонных блоков. Для обделки Ханойского метрополитена используются железобетонные блоки. Основные характеристики тоннелей метрополитена: имеют сечение круглой формы и диаметр $2R = 6.3$ м; в качестве обделки – сборные железобетонные блоки; максимальная глубина тоннеля H составляет 20 м; модуль упругости материала обделки $E_f=36750$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu_f=0.1515$; толщина обделки $t=0.35$ м.

Расчет деформаций и напряжений обделок тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений был произведен с помощью методов Wang и Penzien.

Используя методику (Wang J., 1993) и (Penzien J., 1998), в работе произведен расчёт овализации поперечных сечений цилиндрической тоннельной обделки в рамках рассматриваемой модели «грунт – тоннельная обделка». Результаты численных расчетов изгибающих моментов, продольных сил в тоннельных обделках приведены на рисунках 4, 5.

Метод HRM применялся для расчета напряженного состояния обделок тоннелей в двух случаях: обделка тоннеля представляет собой монолит и обделка тоннеля со стыками. Результаты численных расчетов продольных сил T , изгибающих моментов M , и перемещений u в тоннельных обделках приведены на рисунках 6, 7, 8.

Рисунок 9 иллюстрирует конечно-элементную модель, созданную для эмпирических расчётов в программе ABAQUS. Чтобы исключить влияние отраженных волн от границ массива грунта, последний моделируется как бесконечная область. На

рисунках 10–11 приведены результаты численных расчётов, выполненных с учетом фактических параметров и характеристик тоннелей метрополитена Ханоя, методом конечных элементов по программе ABAQUS.

Обратим внимание на небольшое отличие результатов расчёта, полученных численно-аналитическими методами, и результатов расчёта, полученных численным методом (методом конечных элементов). С помощью численно-аналитических методов Wang J. и Penzien J. определено максимальное нормальное напряжение $\sigma_{\max} = 5.757$ МПа. Решая задачу методом конечных элементов, было получено максимальное нормальное напряжение в обделке тоннеля $\sigma_{\max} = 5.782$ МПа. Исходя из полученных значений видно, что отклонение не превышает 3%. С помощью результатов, установленных с помощью программного комплекса ABAQUS и численно-аналитическими методами, можно сделать следующий вывод: посчитанные максимальные значения напряжений в тоннельной обделке метрополитена Ханоя гораздо ниже установленных пределов значений напряжений в тоннельной обделке, согласно установленным нормативам (предельное напряжение в обделке тоннеля равно $[\sigma]_{кр} = 22$ МПа). Другими словами, обделка тоннелей метрополитена Ханоя находится в надёжном состоянии и устойчива к землетрясениям.

Метод HRM, примененный в работе для расчёта основных параметров напряженного состояния тоннельной обделки метрополитена Ханоя (обделка тоннеля представляет собой монолит или обделку тоннеля со стыками) под воздействием сейсмических волн землетрясений, а также численные результаты на основе вычислительной программы ABAQUS, дают возможность получить необходимые значения внутренних усилий в поперечных сечениях (круглой формы) тоннельных обделок. При наличии стыков в обделке тоннеля, понижающих значения изгибающего момента M_{\max} , значения максимального нормального напряжения σ_{\max}

уменьшаются в обделке тоннеля, при этом значения перемещений обделки тоннеля незначительно возрастают.

Отметим, что в работе разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений, направленных вдоль оси тоннеля.

Необходимый учёт взаимодействия обделки тоннеля с грунтом в работе производится в рамках применения упругого основания Винклера. Тогда необходимые формулы для значений усилий имеют вид:

$$M_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D}{1 + \frac{E_I I \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4}{K_h}} E_I I; V_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D}{1 + \frac{E_I I \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4}{K_h}} E_I I; Q_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right) D}{2 + \frac{E_I A \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2}{K_h}} E_I A. \quad (8)$$

В формулах (8) коэффициенты упругого основания K_h и K_a определяются на основе результатов исследований John C.M.St., Zahrah T.F., по формуле:

$$K_h = K_a = \frac{16\pi G(1-\nu)(2R)}{3-4\nu} \cdot \frac{1}{L}. \quad (9)$$

При учёте взаимодействия обделки тоннеля с грунтом с использованием упругого основания с двумя коэффициентами постели k_1 и k_2 усилия определяются по формулам:

$$M = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D}{1 + \frac{E_I I \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4}{k_1} + \frac{k_2 \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2}{k_1}} E_I I; V = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D}{1 + \frac{E_I I \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4}{k_1} + \frac{k_2 \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2}{k_1}} E_I I;$$

$$k_1 = K_h = K_a; k_2 = 0.5\sqrt{k_1 E_I I}. \quad (10)$$

где M – изгибающий момент, Hm ; V – поперечная сила, H ; Q – продольная сила, H ; I – осевой момент инерции тоннельной обделки, m^4 ; E_I – модуль упругости тоннельной обделки, H/m^2 ; G – модуль сдвига грунта, kH/m^2 ; ν – коэффициент Пуассона грунта; $2R$ – диаметр обделки тоннеля, m ; D – амплитуда поперечной волны, m ; L

– длина поперечной волны, m ; A – площадь поперечного сечения обделки, m^2 .

Таким образом, из полученных результатов для двух вариантов расчета: взаимодействие рассматриваемого подземного сооружения с грунтом с использованием упругого основания Винклера и взаимодействие подземного сооружения с грунтом с использованием упругого основания Винклера с двумя коэффициентами постели, можно сделать вывод: Максимальные значения напряжений в обделке тоннеля Ханойского метрополитена существенно меньше предела прочности материала обделки тоннелей ($\sigma_{\max} = 3.047 \text{ МПа} < [\sigma]_{кр} = 22 \text{ МПа}$ - при учёте взаимодействия конструкции с грунтом с использованием упругого основания Винклера; $\sigma_{\max} = 11.19 \text{ МПа} < [\sigma]_{кр} = 22 \text{ МПа}$ - при учёте взаимодействия конструкции с грунтом с использованием упругого основания Винклера с двумя коэффициентами постели). Исходя из полученных результатов расчетов, в диссертационной работе сделан вывод о том, что обделки тоннелей метрополитена Ханоя устойчивы и выдержат нагрузки, вызванные землетрясениями и сейсмической активностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Разработан численно-аналитический метод расчета воздействия сейсмических волн землетрясений на обделки тоннелей метрополитена с учетом влияния стыков между частями обделок (сегментами).

2. Проведены исследования результатов натуральных замеров и уточнены геологические и гидрогеологические параметры центральной части Ханоя, где залегает система тоннелей метрополитена.

3. Получены характеристики сейсмических волн землетрясений максимальной интенсивности для Ханоя.

4. Обоснован выбор материала для обделок тоннелей метрополитена Ханоя и их параметров с учетом воздействия на них сейсмических волн землетрясений.

5. Расчеты воздействия сейсмических волн землетрясений с максимальной интенсивностью для Ханоя на обделки тоннелей метрополитена произведены как численно-аналитическими методами, так и численным методом конечных элементов. Произведено широкое сравнение полученных результатов на основе численно-аналитического метода и численным методом с натурными замерами землетрясения (Ханой, 1983).

Основные положения диссертации опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. **Господариков А.П.** О некоторых подходах определения напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя с учетом влияния сейсмических волн землетрясений /Господариков А.П., **Нгуен Чи Тхань** // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). Т.6, 2017. – С. 244-252.

2. **Нгуен Чи Тхань.** Расчет напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений / **Нгуен Чи Тхань** // Известия Тульского Государственного Университета – Науки о земле. Вып.1, 2018. – С. 296-306.

3. **Господариков А.П.** Исследование напряженного состояния сопряжений в поперечных сечениях обделок тоннелей метрополитена Ханоя при воздействии сейсмических волн землетрясений / Господариков А.П., **Нгуен Чи Тхань** // Маркшейдерский вестник – Горная Геомеханика, 2, 2018. – С. 44-49.

Работы в других изданиях:

4. **Gospodarikov Alexandr.** Liquefaction possibility of soil layers during earthquake in Hanoi / Gospodarikov Alexandr, **Thanh Nguyen Chi** // International Journal of GEOMATE, Vol. 13, Issue 39, 2017. – P. 148-155.

5. **Gospodarikov Alexandr**. Influence of Segmental Joints in the Segmental Circular Tunnel Lining under the Impact of Earthquakes / Gospodarikov Alexandr, **Thanh Nguyen Chi** // International Journal of Engineering and Technology, Vol. 9, Issue 5, 2017. – P. 4535-4542.
6. **Gospodarikov Alexandr**. The impact of earthquakes of tunnel linings: A case study from the Hanoi metro system / Gospodarikov Alexandr, **Thanh Nguyen Chi** // International Journal of GEOMATE, Jan., Vol. 14, Issue 41, 2018. – P. 151-158.
7. **Gospodarikov Alexandr**. Behaviour of segmental tunnel linings under the impact of earthquakes: A case study from the tunnel of Hanoi metro system / Gospodarikov Alexandr, **Thanh Nguyen Chi** // International Journal of GEOMATE, Jan., Vol. 15, Issue 48, 2018. – P. 91-98.
8. **Gospodarikov Alexandr**. Different behavior of circular and rectangular tunnels under the impact of earthquakes: A case study from the tunnel of Hanoi metro system / Gospodarikov Alexandr, **Thanh Nguyen Chi** // International Journal of GEOMATE, Jan., Vol. 15, Issue 51, 2018. – P. 217-224.
9. **Gospodarikov Alexandr**. Behaviour of soils under the impact of earthquakes: A case study from the center of Hanoi / Gospodarikov Alexandr, **Thanh Nguyen Chi** // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 13, Issue 13, 2018. – P. 4126-4135.
10. **Gospodarikov Alexandr**. The reasonable cross-section shape for the tunnel from Hanoi metro system under the impact of earthquakes / Gospodarikov Alexandr, **Thanh Nguyen Chi** // International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 9, Issue 12, 2018. – P. 871-880.
11. **Gospodarikov Alexandr**. The impact of earthquakes on the tunnel from Hanoi metro system when the tunnel has a horseshoe shape cross-section / Gospodarikov Alexandr, **Thanh Nguyen Chi** // International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 10, Issue 2, 2019. – P. 79-86.

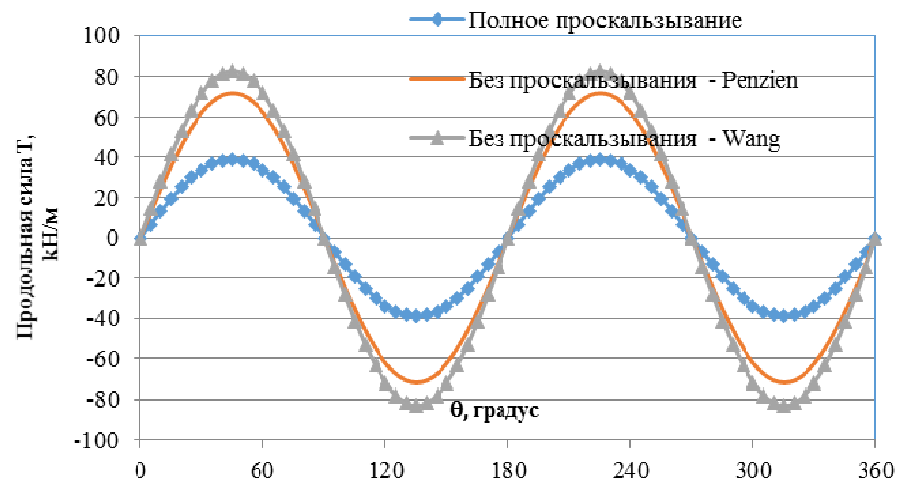


Рисунок 4 – Продольная сила T , кН/м

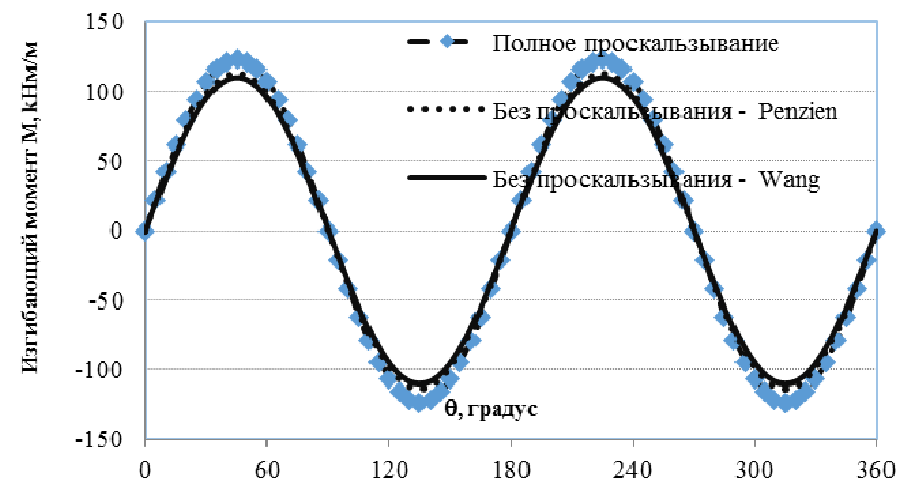


Рисунок 5 – Изгибающий момент M , кНм/м

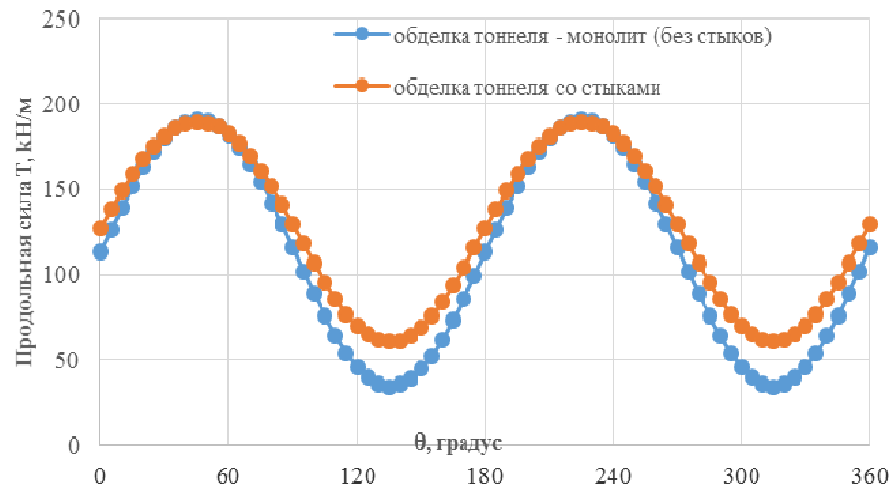


Рисунок 6 – Продольная сила T , кН/м (метод HRM)

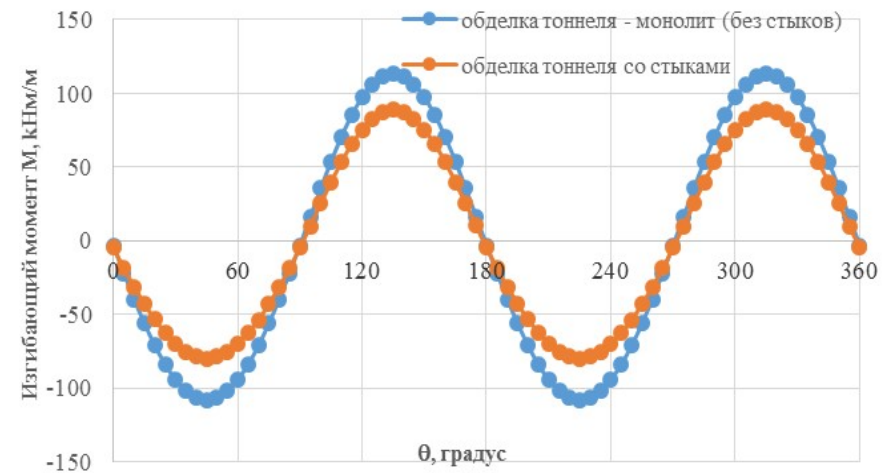


Рисунок 7 – Изгибающий момент M , кНм/м (метод HRM)

