

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«Санкт-Петербургский горный университет»**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель**

доктор технических наук,

профессор А.П. Господариков

Санкт-Петербург – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	8
1.1 Краткий обзор подземных сооружений (метрополитенов) мира.....	8
1.2 Основные характеристики метрополитена Ханоя .....	15
1.3 Сейсмические волны, типы, воздействие их на тоннели метрополитена .....	18
1.4 Выводы по главе 1 .....	27
<b>ГЛАВА 2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВОЛН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ</b> .....	28
2.1 Общие положения.....	28
2.2 Расчет влияния волн землетрясений в поперечных сечениях обделок тоннелей метрополитена.....	35
2.3 Расчет обделок тоннелей метрополитена под воздействием сейсмических волн землетрясений, направленных вдоль оси тоннелей .....	58
2.4 Выводы по главе 2 .....	66
<b>ГЛАВА 3 ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ХАНОЕ</b> .....	67
3.1 Геологические условия Ханоя.....	67
3.2 Сейсмические условия во Вьетнаме и Ханое.....	69
3.3 Краткий обзор воздействия сейсмических волн землетрясений на метрополитен Ханоя.....	72
3.4 Выводы по главе 3 .....	77
<b>ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ (ОБДЕЛОК) ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА ХАНОЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ</b> .....	78
4.1 Основные характеристики метрополитена Ханоя .....	78
4.2 Выбор тип крепи (обделок) для тоннелей метрополитена Ханоя.....	79
4.3 Расчёт параметров крепи (обделок) тоннелей метрополитена Ханоя .....	84

4.4 Выводы по главе 4 .....	96
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	97
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	98
Приложение А: метод HRM - данные, рассчитанные для обделки тоннеля под воздействием землетрясения, под углом $0^\circ$ . .....	111
Приложение Б: метод HRM - данные, рассчитанные для обделки тоннеля под воздействием землетрясения, под углом $45^\circ$ . .....	152

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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., Булычев Н.С., Огородников Ю.Н., Тимофеев О.В., Лебедев М.О., Руппенейт К.В., Безродный К.П., Трушко В.Л., Во Чонг Хунг, Нгуен Куанг Фич, Нгьем Хыу Хань и др.

Исследованием воздействия динамических нагрузок, в том числе 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 Z.Z., Penzien J., Wu C., Naggar H. E., Hinchberger S. D., Newmark N.M., Staint J., Zahrah T.F., Power M.S., Rosidi D. и др.

### **Цель 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 на крепь 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**

- Разработана и обоснована геомеханическая модель воздействия сейсмических волн землетрясений на неоднородный массив горных пород, вмещающий тоннели метрополитена Ханоя с учетом геологических условий их залегания;
- 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, выводов 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.

**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, список использованной литературы, состоящий из 108 наименований, 55 рисунков и 15 таблиц.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований докладывались неоднократно 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).

## ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 1.1 Краткий обзор подземных сооружений (метрополитенов) мира

**Информация о мировых системах метро до 1965 года.** В связи с ростом экономики и населения в крупных городах мира спрос на транспортные и инфраструктурные системы значительно вырос. Свойства старой системы инфраструктуры, такие как ширина улиц, пересечения улиц, плотность строительных систем вдоль улиц не способствовали повышению пропускной способности и скорости общественного транспорта. Таким образом, во многих крупных городах Европы, Америки и Азии назрела необходимость создания другого вида общественного транспорта – метрополитена.

Первая система метрополитена (Лондон) имела следующие характеристики: тоннели весьма неглубокие, близко расположенные к поверхности земли. Длина первого тоннеля метрополитена составляла 6,4 км. Система была построена за 3 года (строительные работы закончились в 1863 году). В первые 7 лет эксплуатации использовались паровозы для всей системы метрополитена Лондона. В 1890 г. в лондонской системе метро начали эксплуатировать локомотивы с электрическим приводом, которые позволили преодолеть существенный недостаток при использовании паровозов, такой как распространение дыма, возникающий в тоннельной системе [20, 21].

В 1900 г. начала действовать Парижская система метро. В 1902 г. была открыта линия метрополитена в Берлине [21].

Системы метрополитенов были построены и развивались очень быстро в других крупных городах мира. Система метрополитена может состоять из двух частей: как подземной, так и наземной. Таким образом, система метрополитена стала неотъемлемой частью транспортной системы крупных городов мира, что привело к массовому строительству линий метрополитенов.

Следует отметить, что подземные участки системы метрополитена часто

строятся в центральных городских районах, где плотность населения и зданий велика. В пригороде система метрополитена обычно строится на поверхности земли и тесно связана с другими видами наземного транспорта.

В России первая линия метро протяжённостью 11 км с 13 станциями была построена и введена в эксплуатацию в 1935 году (Москва). В условиях Великой Отечественной войны в Москве постоянно строят и развивают систему метро, считающейся одной из крупнейших и лучших систем метро в мире [20]. Санкт-Петербург (Ленинград) является вторым по величине городом России, для которого также важно развитие системы метро. Первая линия метрополитена была построена и введена в эксплуатацию в Ленинграде в 1955 году. При строительстве линий метрополитена здесь использовался большой опыт, полученный при строительстве метро в Москве [20, 21].

Общие сведения информация о системах метро крупных городов мира на 1955-1956 г.г. приведены в таблице 1.1. Системы метрополитена в Москве и Санкт-Петербурге оценены как лучшие системы метро в мире. Эти системы метрополитенов имеют следующие характеристики: высокие скорости движения, комфорт, чёткий график движения и полная практическая безопасность.

В качестве примера приводится станция «Комсомольская» (рисунок 1.1), а общая схема Московского метрополитена приведена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.1 – Станция «Комсомольская-кольцевая» Московского метрополитена, 1956 год [20]

Таблица 1.1– Общие сведения информация о системах метро крупных городов мира [20]

Общие данные о метрополитенах							
Города	Число линий	Количество станций	Общая протяженность, км		Ширина колеи, мм	Длина станционной платформы, м	Средняя длина перегона, м
			Всего, км	Наземных, км			
Москва	5	47	65	1	1524	155	1500
Ленинград	1	10	15	-	1435	155	1500
Париж	15	370	190	28	1440	70 и 130	520
Нью-Йорк	38	530	400	175	1435	180	800
Лондон	6	278	360	145	1435	150	1400
Глазго	1	15	10,4	-	1400	40	700
Берлин	5	102	80	20	1435	90 и 130	775
Гамбург	5	62	66	54	1220	150	1000
Мадрид	5	55	28	65	1435	60	800
Вена	4	25	26,4	20	1430	50	1000



Рисунок 1.2 – Схема Московского метрополитена – 1956 год [20]

Конечно, системы метрополитенов других крупных городов мира также имеют определенные преимущества, такие как: наличие справочной системы информации о работе системы метрополитена и информации о подключении системы метрополитена к другим транспортным системам. Некоторые эксплуатационные характеристики метрополитенов мира приведены в таблице 1.2.

Первая железнодорожная линия в системе метро Ленинграда начала функционировать в ноябре 1955 года с восемью станциями и длиной 11 км. Вторая линия системы метро в Ленинграде была введена в эксплуатацию в июле 1958 года в количестве двух станций и длиной 4 км.

Первая линия метро была открыта в Париже в 1900 году - системы

Парижского метрополитена, которая имела следующие характеристики: длина 10 км, 18 станций. К 1956 году система парижского метро имела длину 190 км и 28 км наземных участков. Общее количество станций метро составляет 370 при среднем расстоянии 520 м между двумя соседними станциями.

В 1956 году Берлинская система метрополитена имела общую длину 80 км. Из них более 60 км проложено в тоннелях. Остальная часть системы Берлинского метрополитена включает открытые участки и виадуки - около 20 км.

Нью-йоркская система метро имела следующие характеристики на 1956 год: общая длина 400 км, в том числе 175 км наземных участков, 38 линий.

В 1927 году была введена в эксплуатацию первая линия токийского метрополитена. Первая линия Токийского метрополитена имеет длину 14,4 км. Вторая линия была построена и введена в эксплуатацию в 1954 году длиной 6,6 км. К 1956 году в Токийском метрополитене было 24 станции с расстоянием 940 м между двумя соседними станциями. Система метрополитена Токио способна перевозить в среднем 360 тыс. пассажиров в день [20].

**Общие данные о современных метрополитенах до 2016 года.** Система Московского метрополитена имеет один из самых высоких в мире пассажиропотоков. При этом 56 % – это доля метрополитена в перевозке пассажиров на всех видах пассажирских перевозок города.

Согласно плану развития Московского метрополитена до 2020 года, в Московском метрополитене будет 223 станций, имеет длину 160 км.

В настоящее время в Петербургском метрополитене имеется 5 линий протяженностью 113,6 км.

Как упоминалось выше, система Лондонского метрополитена является первой в мире системой метро. По состоянию на 2016 год система Лондонского метрополитена имеет длину 402 км с 11 линиями; 180 км составляют тоннели.

Таблица 1.2 – Эксплуатационные показатели метрополитенов [20, 21]

Города	Суточный пассажиро-поток, тыс. человек	Максимальная вместимость состава, человек	Колво, пассажиров на вагонокилометр	Количество вагонов в составе	Пропускная способность линии (макс), тыс., чел./час	Средняя скорость сообщения, км/ч
Москва	2800	1500	8,3	6	57	38/43
Ленинград	300	1000	6,2	4	30	38
Нью-Йорк	6000	3000	3,3	10/14	96	32/40
Лондон	2000	1750	1,9	8	61	34,5
Париж	3000	740	6,5	6	27	25
Берлин	750	960	7,0	5/8	24	25
Гамбург	450	850	5,4	8	20,5	30
Глазго	105	160	7,7	2	3,6	22,5
Рим	-	1400	-	7	17	40
Мадрид	950	520	-	4	16	22
Осло	55	360	-	2	15	-
Стокгольм	200	1200	8,4	8	29	32
Чикаго	900	1100	-	6	20	34,5
Бостон	-	1100	-	6	29	31
Филадельфия	500	1400	-	6	42	27
Торонто	200	1400	-	6	34	30

Система Парижского метрополитена длиной 220 км, в основном, состоит из тоннелей и подземных сооружений. Парижский метрополитен имеет 303 станции с 62 пересадками. Среднее расстояние между двумя соседними станциями Парижского метрополитена составляет 562 метра. Есть также 21 надземная станция (из них бóльшая часть расположена на 6-й линии).

Система метрополитена Парижа имеет пассажиропоток в 4,5 миллиона пассажиров в день. Пассажиропоток парижской системы метрополитена занимает 10-е место в мире и 2-е в Европе после Московского метрополитена.

Берлинская система метрополитена (до 2016 года) имеет длину 151,7 км. Берлинская система метрополитена имеет 173 станции, 9 линий и 80% метрополитена Берлина являются тоннелями. По статистике в 2011 году системой метрополитена Берлина воспользовались 505,2 миллиона пассажиров.

Система Нью-Йоркский метрополитена – это система метрополитена с наибольшим количеством станций в мире. Протяженность нью-йоркской системы метро – 1355 км, количество станций – 469.

Система Токийского метрополитена является одной из крупнейших в мире системой пассажирских перевозок (285 станций). По данным 2016 года, токийской системой метро воспользовались 3217 миллионов пассажиров в год. Система метрополитена Токио хорошо связана с другими транспортными системами, такими как железнодорожные поезда, однопутные поезда (Shinkansen) и другие транспортные системы. На станции Синдзюку около 2 миллионов пассажиров пользуются ежедневно системой метро. Это самая используемая станция в мире. В системе метро Токио имеются информационные центры по системам метро и другим транспортным системам. Остановки объявляются на японском и английском языках, реже – на китайском.

## 1.2 Основные характеристики метрополитена Ханоя

Несмотря на то, что Ханой – столица Вьетнама, по величине город находится на втором месте и имеет население около 8 миллионов человек.

В настоящее время в городе Ханой есть только автобусные системы. Это действительно большая проблема для транспорта Ханоя. Чтобы решить эту проблему, в Ханое будут построены линии метро. Как и планировалось, первая линия метро в Ханое будет завершена к 2025 году.

В транспортном планировании города Ханоя, будут построены метро, железнодорожные и автобусные системы, которые будут соединяться друг с другом. Система радиальных дорог и поясов в городе Ханое также была разработана. В своем плане развития транспортной системы, Ханой построит 8 линий метро, 9 скоростных автобусных маршрутов и 6 систем автомобильных дорог.

Общая схема транспортной системы Ханоя изображена на рисунке 1.3, а также в таблице 1.3 [8, 12, 13, 19, 35].

Общая информация о планах развития транспортной системы Ханоя приведена на рисунке 1.3 и в таблице 1.3 [19, 35].

В приведенных выше таблицах информация о системах метро Ханоя четко представлена. Линии метро построены с целью соединения аэропортов и станций с центральными районами города Ханоя.

В соответствии с этим планом будет построено 240 км наземных поездов и более 60 км линий метрополитена. некоторые видные линии метро, такие как линия №2 (Нойбай – Тхьонгдйнь): Линия № 2 имеет длину 35,2 км. Эта линия № 2 соединяет международный аэропорт Ной Бай с центром города Ханой. Линия № 6, эта линия начинается от станции КатЛинг и заканчивается на станции Хадонг. Линия № 2 будет соединена с линией № 6 для обслуживания транспорта из пригородных районов в центр города Ханоя. Линия № 2 состоит из 6 километрового тоннеля метро с 7 станциями.



Ханой, Вьетнам

Рисунок 1.3 – Схема планируемых городских железнодорожных линий в Ханое [35]

В плане Ханоя по развитию системы метро, первая линия метро Ханоя состоит из двух частей, надземные и подземные линии. В части наземных линий есть 8 станций, общая длина этого участка составляет 8,5 км. В части подземных линий есть 4 станции длиной 4 км. первая линия метро Ханоя имеет станцию, начинающуюся от станции Нхонь и заканчивающуюся на станции Ханоя (рисунок 1.4).

Таблица 1.3 – Система линий метро города Ханоя в соответствии с планом [10, 14, 35]

Номер маршрута	Маршруты	Длины
Линия №1	Нгокхой – Енвьен	38,5 км
Линия №2	Нойбай – Тхыонгтйнь	35,2 км
Линия №2а	Катлинг – Хадонг	13 км
Линия №3	Чой Ньон – Еншо	22 км
Линия №4	Льенха – СеверТханглонг	55 км
Линия №5	Юг Западного озера – Хоалак	35,5 км
Линия №6	Нойбай – Нгокхой	47 км
Линия №7	Мелйнг – Нгокхой	35 км
Линия №8	Конуе – Чаукуин	29 км

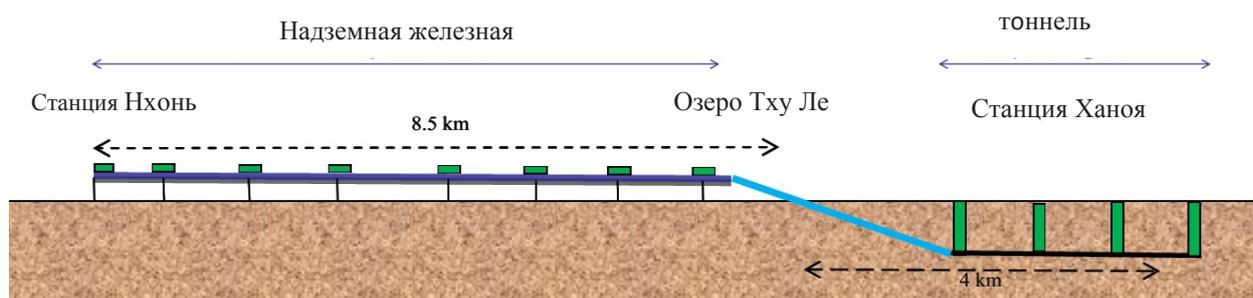


Рисунок 1.4 – Планирование маршрутов и станций метрополитена Ханоя [35]

Технические характеристики сечения тоннеля Ханойского метрополитена на линии метро 1. Тоннель с круглым сечением выполнен из железобетонного материала. Диаметр тоннеля составляет 6,3 м. Глубина тоннеля равна  $H = (10 - 20)$  м (рисунок 1.5).

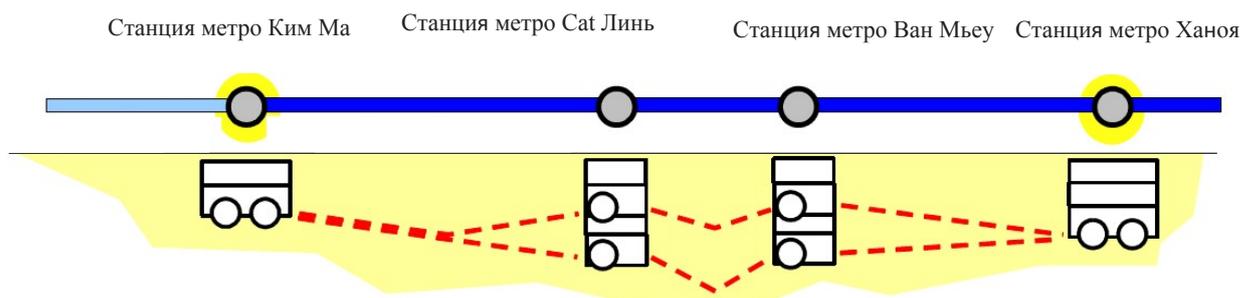


Рисунок 1.5 – Схема подземных станций метрополитена Ханоя [10, 35]

### 1.3 Сейсмические волны, типы, воздействие их на тоннели метрополитена

**Опыт учета воздействия сейсмических волн землетрясений на метрополитен.** Землетрясениями называются колебания земной поверхности, вызванные внутриземными процессами. Землетрясения – возникающие в результате разрывов в земной коре или верхней части мантии Земли, а также внезапных смещений горных пород. В центре очага землетрясений условно выделяется точка, именуемая гипоцентром [21, 23, 81]. Проекция гипоцентра на поверхность Земли называется эпицентром. Вокруг эпицентра возникает самая большая разрушительная зона землетрясения. Основываясь на глубине расположения гипоцентра, землетрясения делятся на три группы: мелкофокусные (с глубиной гипоцентра до 70 км), промежуточные (с глубиной гипоцентра от 80 до 300 км) и глубокофокусные (с глубиной гипоцентра свыше 300 км).

Две группы волн землетрясений могут появляться и распространяться в грунте: первая группа – при достижении поверхности земли отражаются и генерируют поверхностные волны; вторая группа волн определяется как объемные волны [21, 23, 27, 59].

**Сейсмические волны.** Итак, сейсмических волны можно разделить на две группы [6, 7, 8, 22, 23, 59]: объёмные волны и поверхностные волны.

#### Объемные волны

Первым типом объемной волны является волна сжатия – продольная волна, также называемая Р-волной, при распространении которой частицы грунта перемещаются в направлении распространения волны. Энергия сейсмической волны землетрясения рассеивается в направлении распространения Р-волны; S-волна – второй тип объемной волны землетрясения. S-волны вызывают смещение частиц вещества среды в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны, поэтому S-волны также называют поперечными волнами. Скорость распространения S-волн меньше скорости распространения Р-волн; S-

волны могут распространяться в среде твердых пород. Характер деформации среды при распространении объемных Р-волн и S-волн представлен на рисунке 1.6.

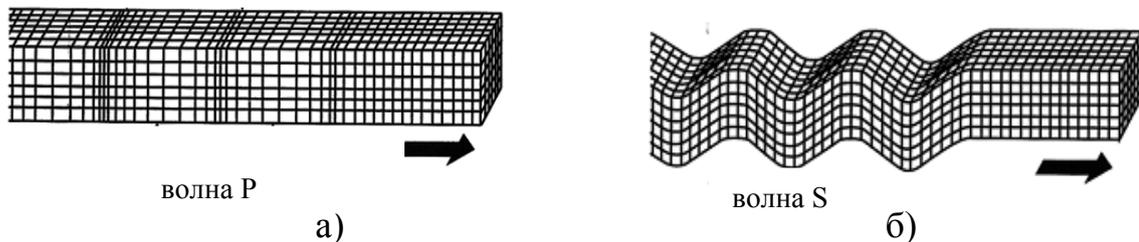


Рисунок 1.6 – Вид деформаций среды при распространении волн.

Продольная волна (а) и поперечная волна (b) [6, 7, 8, 22, 23]

Скорости распространения объемных волн в грунтах определяются следующими выражениями [6, 7, 8]:

$$C_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (1.1)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad (1.2)$$

где  $C_P$  – скорость распространения продольных волн, м/с;  $C_S$  – скорость распространения поперечных волн, м/с;  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\rho$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

### Поверхностные волны

Поверхностные волны – это тип сейсмических волн, которые формируются отражениями от границы окружающей среды. Существует два типа поверхностных волн: волны Лява и волны Рэлея. Волны Лява поляризуются в горизонтальном направлении, заставляя частицы среды двигаться горизонтально, перпендикулярно распространению волн. Волны Рэлея поляризованы вертикально, заставляя частицы среды двигаться в продольном направлении распространения волн. Волны Лява и волны Рэлея появляются только в поверхностных слоях Земли. Согласно результатам исследований, полученным

из экспериментальных измерений и теоретических расчетов, около 60% энергии очага землетрясения уходит на создание волн Лява и Рэлея в случае поверхностного либо приповерхностного источника землетрясения [6, 7, 8, 21, 22, 23, 87, 88].

Скорость распространения поверхностных волн Рэлея меньше скоростей распространения объемных волн в виде S-волн и P-волн. Характер деформации среды при распространении различных поверхностных волн представлен на рисунке 1.7.

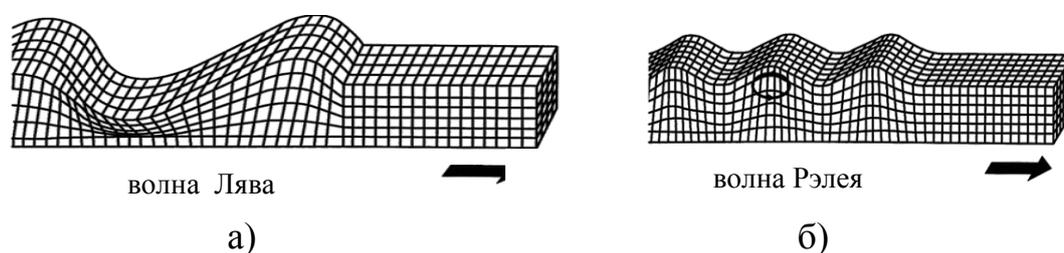


Рисунок 1.7 – Вид деформаций среды при распространении волны Лява (а) и волны Рэлея (б) [6, 7, 8, 19, 22, 23, 81]

С учетом упругих свойств среды, скорости распространения объемных волн различны [21, 22, 81].

Волны Рэлея переносят большую часть энергии источника землетрясения; вызывают интенсивные колебания поверхности и являются главной причиной разрушения сооружений [21, 22, 23, 81]. Колебания грунта под воздействием сейсмических волн землетрясений весьма различны. Метрополитен Ханоя находится близко к поверхности земли и находится в слабом грунте, и под воздействием волн землетрясений может быть нарушена его эксплуатация.

**Воздействие сейсмических волн на тоннели метрополитена.** Под воздействием сейсмических волн, подземные сооружения, особенно подземные сооружения, находящиеся близко к поверхности земли, будут иметь очень различное влияние от них, в зависимости от интенсивности землетрясения, а также характера ведения подземных работ и геологических параметров среды,

вмещающей тоннели метрополитена.

Учёные Dowding С.Н. и Rozen А. классифицировали повреждения тоннелей, учитывая воздействие на них сейсмических волн землетрясений [19, 35, 44, 45, 50].

1. Подземные сооружения получают значительно меньше повреждений, чем наземные сооружения.

2. Сообщаемый урон уменьшается с увеличением глубины вскрыши. Глубокие тоннели кажутся более безопасными и менее уязвимыми к землетрясениям, чем неглубокие тоннели.

3. Можно ожидать, что подземные сооружения, построенные в грунты, получают больший урон.

4. Ущерб от тряски может быть уменьшен путем стабилизации грунта вокруг тоннеля и улучшения контакта между обделки и грунта вокруг тоннеля за счет цементации.

5. Тоннели более устойчивы при симметричной нагрузке, что улучшает взаимодействие с грунтом.

6. Повреждение может быть связано с пиковым ускорением и скоростью грунта в зависимости от величины и эпицентрального расстояния пострадавшего землетрясения.

7. Длительность сильных встряхиваний во время землетрясений имеет первостепенное значение, потому что это может вызвать усталостное разрушение и, следовательно, большой деформации.

8. Движение грунта может усиливаться при падении в тоннель, если длины волн в один-четыре раза превышают диаметр тоннеля.

9. Повреждение на и около тоннельных порталов может быть значительным из-за неустойчивости склона.

Owen G.N. и др. в работе [73] обосновал, что при сейсмическом воздействии могут возникать три вида деформации тоннеля. Подземные сооружения могут

иметь меньше повреждений от воздействия волн землетрясений, если длина волны значительно больше диаметра подземного сооружения.

На рисунках 1.8 и 1.9 приведены характеристики деформации тоннеля при сейсмическом воздействии сейсмических волн землетрясений и при различных поперечных сечениях обделок тоннеля, соответственно.

В таблице 1.4 приведены различные случаи разрушения тоннеля от воздействия сейсмических волн землетрясений, а в таблице 1.5 – повреждения подземных сооружений при воздействии сейсмических волн землетрясений [48, 49, 50, 64].

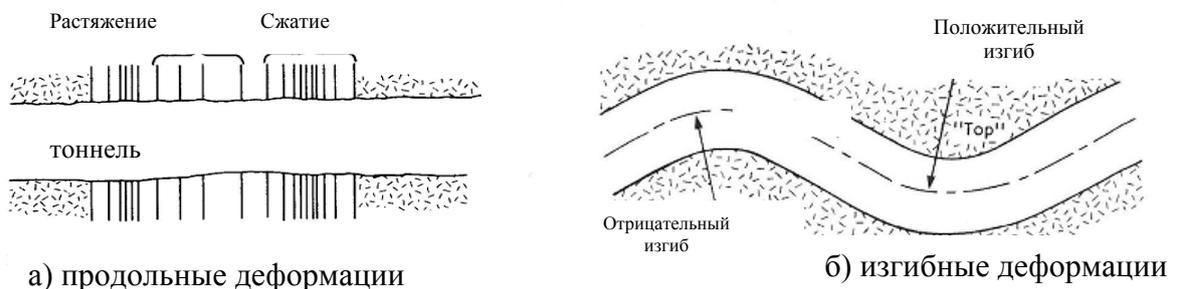


Рисунок 1.8 – Вид деформаций тоннеля при сейсмическом воздействии: продольные деформации (а) и изгибные деформации (б) [50]

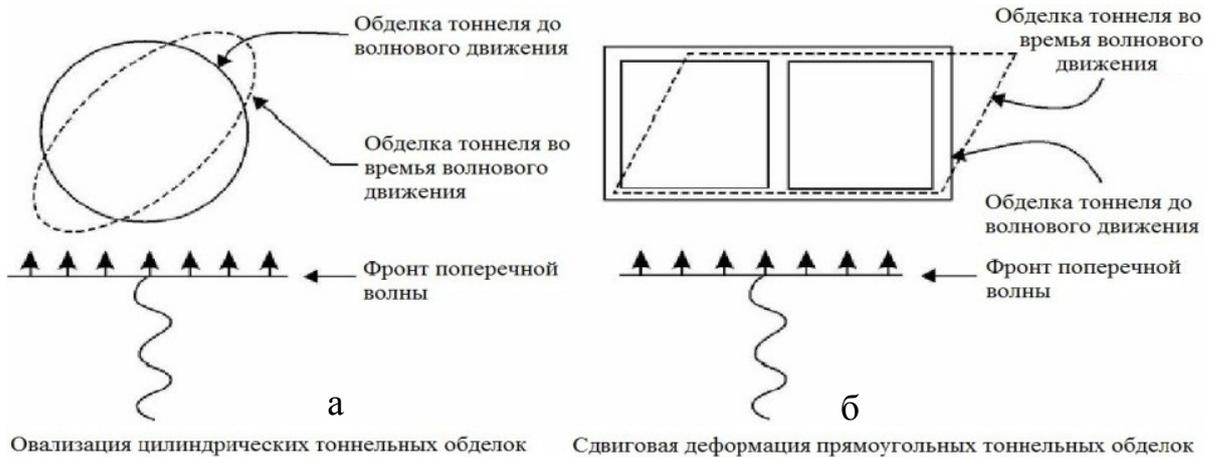
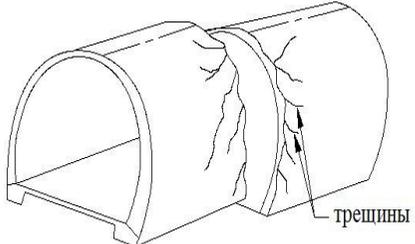
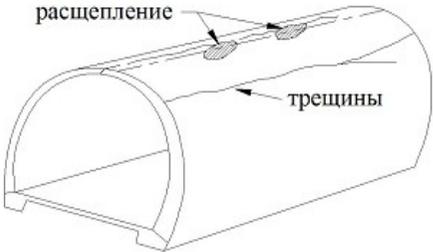
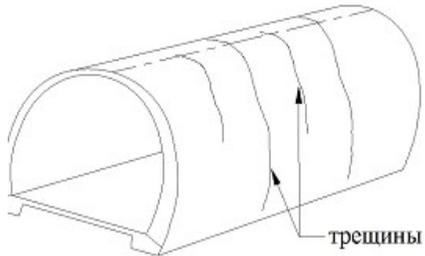
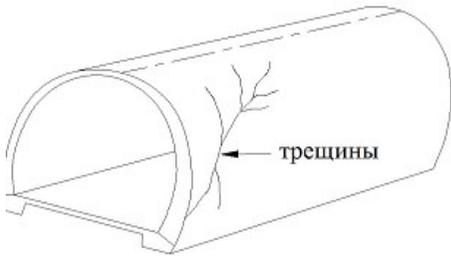
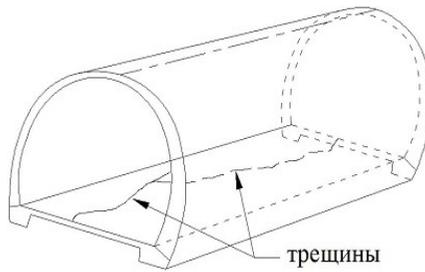


Рисунок 1.9 – Деформации поперечных сечений тоннельных обделок при распространении поперечных волн в вертикальном направлении (а – круглого сечения; б – прямоугольного сечения)

Таблица 1.4 – Случаи разрушения тоннеля от воздействия сейсмических волн землетрясений

Номер	Случай разрушения тоннеля от сейсмических волн	Характеристики	Рисунок
1	Разрушение обделок тоннеля при сдвиге	Наибольшую опасность для тоннельной обделки представляют смещения грунта по разломам или большие смещения грунтовых массивов, возникающих вследствие их неустойчивости из-за разжижения, возникновения оползней.	 <p>трещины</p>
2	Разрушение тоннеля при обрушении откоса	Такая ситуация возникает при условии, если ось тоннеля параллельна склонам, по которым возможно возникновение оползней, проходящих в окрестности обделок тоннеля.	 <p>обвал</p>
3	Продольные трещины	Продольные трещины появляются в обделках тоннеля под воздействием сейсмических волн землетрясений.	 <p>расщепление трещины</p>

Продолжение таблицы 1.4

4	<p>Поперечные трещины</p>	<p>Когда при распространении волн продольных вдоль тоннеля оси, трещины поперечные возникают.</p>	
5	<p>Наклонные трещины</p>	<p>Землетрясения и наклонные трещины могут образовываться под воздействием волн сейсмических, которые обычно наклонены под углом <math>(30-60)^\circ</math> к горизонту. Трещины на обделок тоннеля появляются на одной стороне.</p>	
6	<p>Трещины основания тоннеля</p>	<p>Трещины основания тоннеля на обделок тоннеля под воздействием волн землетрясений. Представляет собой протяжённые трещины в обделках тоннеля под воздействием волн землетрясений.</p>	

Продолжение таблицы 1.4

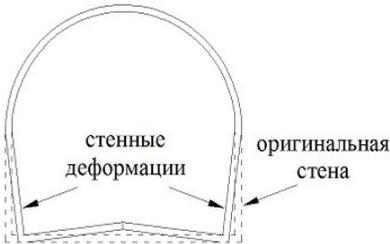
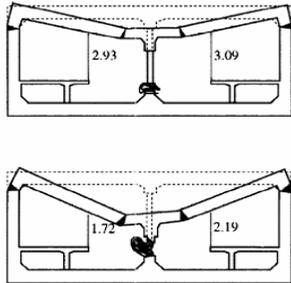
7	Деформации стен	Деформация стен в обделках тоннеля. Повреждения обделок приводят к деформации боковых стен, а также к возникновению в них многочисленных трещин.	
8	Трещины в зонах ниш и соединений	Данные трещины не создают непосредственной опасности для тоннеля, но будут влиять на качество эксплуатации тоннеля.	
9	Виды повреждений тоннелей прямоугольного сечения	Повреждения, деформации или трещины происходят, главным образом, в таких местах, как головка колонны, в обделках тоннеля, где возникают концентрации напряжений.	

Таблица 1.5 – Повреждения подземных сооружений при воздействия волн землетрясений [49, 64, 66]

Номер	Наименование туннеля	Страна	Место	Дата
1	Райт железнодорожного туннеля	США	Сан - Франциско	1906
2	Керн Каунти-тоннель	США	Керн Каунти	1952
3	Тоннель Kinoiga	Япония	Ното	1993
4	Коби-тоннель	Япония	Нуогoken - Нанбу	1995
5	Болу-тоннель	Турция	Дузе	1999
6	Несколько тоннелей	Тайвань	Чи Чи	1999
7	Тоннель Kizawa	Япония	Средний Ниигата	2004

#### 1.4 Выводы по главе 1

1. Проведен анализ научной литературы, посвященный проблемам исследования воздействия сейсмических волн землетрясений на метрополитен.
2. Приведен обзор подземных сооружений (основных метрополитенов мира).
3. Выполнен обзор сейсмических волн (их виды, воздействие на тоннели метрополитена).
4. Представлены генеральный план проектирования и строительства транспортной системы Ханоя, особенности системы метрополитена Ханоя и основные параметры сейсмических волн землетрясений в области расположения Ханоя.

## ГЛАВА 2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВОЛН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

### 2.1 Общие положения

В главе 1 были представлены основные типы волн землетрясений, природа их возникновения и влияние последних на подземные сооружения.

В центре очага землетрясений условно выделяется точка, называемая гипоцентром. Проекция гипоцентра на поверхность земли называется эпицентром землетрясений, вокруг которого располагается область наибольших разрушений.

Землетрясения – это явления, которые могут возникнуть по двум причинам: природные причины – подвижки тектонических плит земной коры и наличие вулканической деятельности в районе действующих вулканов; искусственные причины – результат проведения массовых взрывов (в техногенных и военных целях).

Воздействие волн землетрясений на тоннели метрополитена можно разделить на следующие категории:

- вызывают колебания и смещения грунта; масса грунта, окружающая тоннель, может перемещаться со значительным значением модуля вектора перемещений под воздействием волн землетрясений;
- изменяют свойства грунта среды, вмещающей тоннель, под воздействием волн землетрясений (явление ослабления, разжижения грунта).

Научные исследователи Dowding С.Н. и Rozen А. ввели классификацию повреждений, учитывая характер сейсмических воздействий на подземные сооружения [36].

В своем исследовании ими было обосновано, что тоннель может быть разрушен по следующим причинам:

- тоннель может иметь повреждения, вызванные изменением характеристик окружающего грунта, таким как его разжижение, или наличием оползней;

- повреждения тоннеля из-за смещения грунта в зоне разлома;
- повреждения тоннеля вследствие возникновения колебаний массива грунта, окружающего обделку тоннеля, при распространении сейсмических волн землетрясений.

Таблица 2.1 – Значения отношения максимальной скорости движения грунта частиц к максимальному ускорению движения грунта частиц на поверхности скальных и мягких грунтов под воздействием волн землетрясений [8, 19, 21, 49, 50]

Магнитуда ( $M_w$ )	Отношение максимального значения скорости движения частиц грунта (см/с) к максимальному ускорению этих частиц грунта (g)		
	Расстояние до источника землетрясения (км)		
	0÷20	20÷50	50÷100
Скальный грунт			
6,5	66	76	86
7,5	97	109	97
8,5	127	140	152
Твёрдый грунт			
6,5	94	102	109
7,5	140	127	155
8,5	180	188	193
Мягкий грунт			
6,5	140	132	142
7,5	208	165	201
8,5	269	244	251

В таблице 2.1 приведены значения отношения максимальной скорости движения частиц грунта на поверхности скальных и мягких грунтов к максимальному ускорению этих частиц под воздействием сейсмических волн землетрясений.

Таблица 2.2 – Значения отношения максимального перемещения частиц грунта на поверхности скальных и мягких грунтов к максимальному ускорению частиц на поверхности грунта под воздействием землетрясений [8, 21, 49, 50]

Магнитуда ( $M_w$ )	Отношение максимального значения перемещения частиц грунта (см) к максимальному значению ускорения этих частиц грунта (g)		
	Расстояние до источника землетрясения (км)		
	0÷20	20÷50	50÷100
Скальный грунт			
6,5	18	23	30
7,5	43	56	69
8,5	81	99	119
Твёрдый грунт			
6,5	35	41	48
7,5	89	99	112
8,5	165	178	191
Мягкий грунт			
6,5	71	74	76
7,5	178	178	178
8,5	330	320	305

В настоящее время, согласно статистике, до 50 % населения мира страдает от землетрясений различной интенсивности и частоты. Сильные сейсмические землетрясения затрагивают 10-15% поверхности Земли (со средним периодом повторяемости разрушительных землетрясений один раз в 500 лет). Разрушение подземных сооружений под воздействием землетрясений зафиксированы во многих регионах мира, таких как Турция, Россия, Чили, Вьетнам. Поэтому разработка методов расчета воздействия волн землетрясений на подземные сооружения является весьма актуальной задачей.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны различные методы, используемые для расчета воздействия волн землетрясений на подземные сооружения: аналитические, экспериментальные и численные.

В частности, преимущество аналитических методов расчета воздействия волн землетрясений на подземные сооружения заключается в упрощенной постановке задачи исследования – замена динамической нагрузки на статический ее эквивалент. Однако, невысокая точность полученных результатов тесно связана с невозможностью учета влияния различных параметров грунтовых сред, окружающих подземные сооружения, и использования достоверных данных землетрясений в исследуемом районе. При этом, применение аналитического метода включает в себя следующие моменты: значение параметров горных пород, в которых располагаются подземные сооружения, и данных о землетрясениях (магнитуда, деформации грунта, скорости смещения грунта, максимальное ускорение грунта); анализ подземного сооружения (глубина подземного сооружения, тип и параметры крепи (обделки) подземного сооружения), изучение гидрогеологических условий среды, вмещающей подземные сооружения.

Далее производится расчет статических нагрузок, эквивалентных динамическим нагрузкам землетрясений, и сопоставление результатов расчета с предельными значениями внутренних усилий в тоннельной обделке. В случае, если полученные значения внутренних усилий на подземные сооружения не превышают нормативных, то разрабатываются необходимые рекомендации по

эксплуатации подземного сооружения; в противном случае – изменяются тип и параметры крепи (обделок).

Итак, существует много различных методов оценки и расчета воздействия волн землетрясений на подземные сооружения (основные характеристики представлены на рисунке 2.1).

Численные методы широко используются для оценки воздействия сейсмических землетрясений волн на сооружения подземные. Моделирование напряженного состояния среды (грунта/породы), вмещающей подземное сооружение, под воздействием сейсмических волн землетрясений с использованием, в частности, метода конечных элементов, дает достаточно точные результаты, сопоставимые с результатами натурных замеров.

Отметим некоторые преимущества применения численных методов для оценки воздействия сейсмических землетрясений волн на сооружения подземные:

- возможность учитывать геологические и горнотехнические условия, влияющие на устойчивость подземных сооружений;
- значительно меньшая трудоемкость при их реализации по сравнению, например, с физическим моделированием.

Но, по мнению авторов работы [16, 27, 28], численно-аналитический метод расчета воздействия сейсмических волн землетрясений на подземные сооружения, представленный различными этапами его реализации, по-прежнему остается достаточно эффективным. Приведенные преимущества численных методов совсем не отрицают успешного использования численно-аналитических методов, особенно в условиях имеющейся неопределенности исходных данных.

Для реализации численно-аналитического метода необходимо оценить физические свойства и механические характеристики горных пород вмещающего массива, а затем обосновать выбор геомеханической модели поведения породы (упругая, упругопластическая и др.).

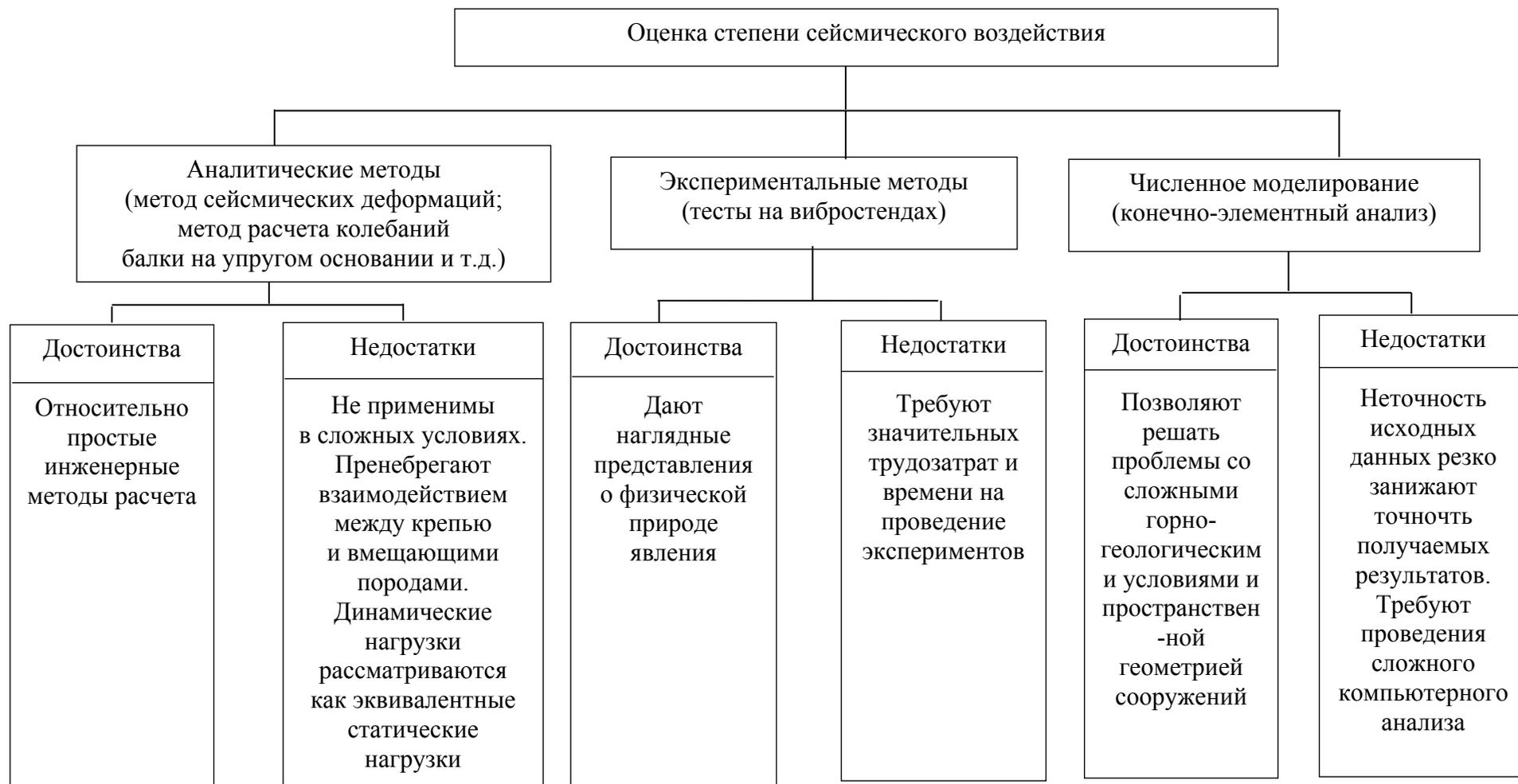


Рисунок 2.1 – Методы расчета динамических нагрузок, вызванных землетрясением, на подземные сооружения [16, 28]

Описать характеристики моделируемой среды (глубина залегания, форма подземного сооружения, тип и параметры крепи (обделки), а также уточнить данные о землетрясениях (принять ускорение землетрясения с максимальной магнитудой). Если необходимо, то произвести корректировку значений ускорения землетрясений в зависимости от глубины и характера грунта/массива горных пород.

Окончательно необходимо провести анализ результатов, полученных численным методом, и их сопоставление с результатами статического расчета.

Деформации обделок тоннелей под воздействием сейсмических волн землетрясений зависит от следующих факторов: характеристик сейсмических волн землетрясений, деформации массива грунта, вмещающего тоннель, и параметров тоннельной обделки. Виды деформации обделок тоннелей под влиянием сейсмических волн землетрясений: продольные деформации (сжатие и растяжение), изгибные деформации и деформации сдвига.

В настоящее время существует множество методов расчета воздействия сейсмических волн землетрясений на тоннели метрополитена. Среди них особенно эффективными являются методы Wang [94], метод Penzien [77, 78], Hashash [49]. Эти методы, в основном, применяются при исследовании воздействия волн землетрясений на тоннели метрополитена в двух случаях: при наличии проскальзывания на границе горных пород и обделки тоннеля и при отсутствие проскальзывания.

Типы грунтов характеризуются следующими диапазонами скоростей волн сдвига [19, 49, 50]:

- скальный грунт не менее 750 м/с;
- твёрдый грунт 200 до 750 м/с;
- мягкий грунт менее 200 м/с.

В таблице 2.3 приведены необходимые коэффициенты, используемые в названных методах расчета напряженного состояния обделок тоннелей, и характеризующие движение массива грунта в зависимости от глубины заложения тоннеля.

Таблица 2.3 – Коэффициенты, характеризующие движение массива грунта в зависимости от глубины заложения тоннеля под воздействием волн землетрясений [8, 19, 50]

Глубина тоннеля (м)	Коэффициенты, характеризующие движение грунта, в зависимости от глубины заложения тоннеля
< 6	1,0
6 -15	0,9
16 -30	0,8
> 30	0,7

## 2.2 Расчет влияния волн землетрясений в поперечных сечениях обделок тоннелей метрополитена

**Поперечные деформации тоннельных обделок при сейсмических воздействиях, соответствующие деформациям сдвига «свободного поля».** Метод, учитывающий деформацию цилиндрической тоннельной обделки, основан на предположении, что тоннельная обделка не оказывает влияния на деформацию грунтовой массы вокруг тоннеля под воздействием волн землетрясений. В этом методе тоннель рассматривается в виде цилиндрической камеры во вмещающемся грунтовой массе под воздействием сейсмических волн землетрясений. Знакопеременные деформации вызывают дополнительные сжимающие и растягивающие напряжения в тоннельной обделке. Такие динамические напряжения будут резонировать с существующими напряжениями в тоннельной обделке. Возможны два случая:

- динамические напряжения могут уменьшать статические напряжения сжатия в тоннельной обделке;

- динамические напряжения вместе с существующими статическими напряжениями в некоторых сечениях тоннеля могут превысить предельно допустимые напряжения для материала тоннельной обделки. Все

вышеупомянутые случаи могут приводить к уменьшению несущей способности обделок тоннеля (при этом могут возникать и растягивающие напряжения).

Итак, под воздействием вертикально распространяющихся волн сдвига круговые сечения тоннелей деформируются в овальные. В рассматриваемом методе расчёта тоннель вмещен в неоднородную среду. Поэтому, слоистые среды заменяются эквивалентными однородными слоями [29]. В результате применения данного метода расчета необходимые распределения напряжений и деформаций от воздействия сейсмических волн землетрясений в «свободном поле» могут быть выражены в зависимости от глубины залегания тоннеля. Максимальная деформация сдвига  $\gamma_{max}$  «свободного поля» может быть выражена в виде зависимости [8, 19, 21, 22, 49, 50, 59, 74, 81, 83, 105, 108]:

$$\gamma_{max} = \frac{V_s}{C_{Se}}, \quad (2.1)$$

где  $V_s$  – пиковая скорость грунта частиц движения, м/с;  $C_{Se}$  – эффективная скорость волн распространения сдвига, м/с.

Эффективные скорости вертикально распространяющихся волн сдвига  $C_{Se}$  соответствуют уровням деформаций сдвига, которые могут возникнуть в грунтовой среде на уровне заложения тоннеля, под воздействием сейсмических волн. Для определения величины значения эффективной скорости распространения волны сдвига в среде  $C_{Se}$ , используются коэффициент торможения и скорость распространения волн сдвига  $C_s$ , зависящие от геомеханических свойств вмещающей грунтовой среды. В условиях твердых пород значение коэффициента торможения имеет большее значение, чем в почвенной среде, где значение коэффициента торможения мало.

В случае залегания тоннеля в слабых грунтах, необходимо рассчитывать значение  $C_{Se}$  – эффективную скорость распространения волн сдвига для строительной площадки с учётом значения коэффициента торможения.

Для случая, когда массив грунта, вмещающий тоннель, имеет большую жесткость, чем жесткость обделки тоннеля, деформация обделки тоннеля в этом случае рассматривается как деформация окружающего массива грунта.

Тоннельная обделка должна иметь такие механические характеристики, чтобы она выдерживала максимальные напряжения, соответствующие деформациям тоннельной обделки под воздействием волн землетрясений.

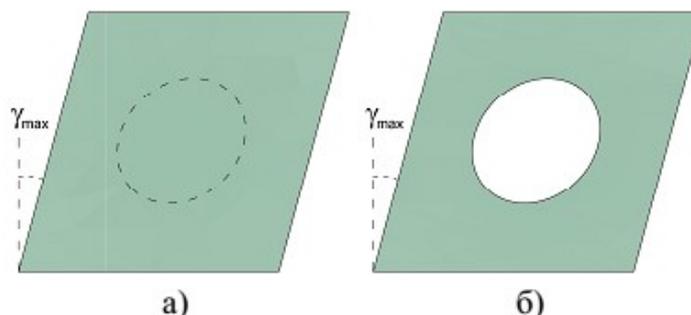


Рисунок 2.2 – Деформация сдвига грунта: а) деформация сдвига «свободного поля»; б) деформация сдвига «свободного поля» с полостью [49, 50]

В рассматриваемом случае деформация сплошной грунтовой среды вокруг тоннеля соответствует деформации тоннельной обделки. Максимальные изменения величин диаметра обделки тоннельной [8, 19, 21, 22, 49, 50, 63, 65]:

$$\Delta(2R)_{f,f} = \pm \frac{\gamma_{\max}}{2} (2R), \quad (2.2)$$

где  $2R$  – диаметр обделки тоннеля;  $\gamma_{\max}$  – максимальные деформации обделок тоннеля сдвига «свободного поля» при воздействии сейсмических волн сдвига.

В случае наличия полости (рисунок 2.2) деформация обделок тоннеля соответствует изменению диаметра обделок тоннелей:

$$\Delta(2R)_{f,f} = \pm 2\gamma_{\max} (1 - \nu_{\max}) (2R), \quad (2.3)$$

где  $\nu_m$  – коэффициент Пуассона вмещающего грунта.

Отметим, что в приведенных выше формулах эффект взаимодействия «грунт-тоннель» не учитывается. Из формул расчета деформации тоннельной обделки под воздействием волн землетрясений можно сделать вывод: если тоннельная обделка имеет большую жёсткость, чем вмещающий массив грунта вокруг тоннеля (тоннель находится в мягком грунте), то под воздействием волн землетрясений происходит искажение обделок тоннеля будет меньше, чем деформация вмещающего массива грунта.

Таким образом, соотношение жесткостей обделок тоннеля и вмещающего грунта играет важную роль в распределении деформаций обделок тоннеля и вмещающего грунта под воздействием землетрясений волн.

**Расчёт поперечных деформаций тоннельных обделок с учётом взаимодействия с грунтом (деформации тоннельной обделки отличаются от деформаций «свободного поля»).**

### 1. Коэффициенты передачи напряжений при сжатии и изгибе

Коэффициенты передач напряжений необходимы для количественной оценки относительной жесткости между тоннельной обделкой и вмещающей горной породой: при изгибе  $F$ , при сжатии  $C$ . Формулы для расчета этих коэффициентов имеют вид:

– коэффициент передачи напряжений при сжатии:

$$C = \frac{(1 - \nu_l^2) R_l E_m}{E_l t_l (1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)} ; \quad (2.4)$$

– коэффициент передачи напряжений при изгибе:

$$F = \frac{(1 - \nu_l^2) R_l^3 E_m}{6 E_l I_{l,1} (1 + \nu_m)} , \quad (2.5)$$

где  $E_m$  – модуль деформации, соответствующий величине деформации массива грунта,  $H/M^2$ ;  $\nu_m$  – коэффициент Пуассона материала грунта;  $\nu_l$  – коэффициент Пуассона материала обделки;  $E_l$  – модуль деформации обделки,  $H/M^2$ ;  $R_l$  – радиус обделки,  $m$ ;  $t_l$  – толщина обделки,  $m$ ;  $I_{l,1}$  – момент инерции сечения тоннельной обделки единичной длины в направлении оси тоннеля,  $M^4$ .

### 2. Метод Wang

Для расчета влияния волн землетрясений на тоннель ученый Wang J. получил расчетные формулы, основанные на следующих предположениях:

– грунтовая среда вокруг тоннеля представляет собой бесконечную, однородную и изотропную среду;

– тоннельная обделка (материал упругий) имеет цилиндрическую форму с тонкой толщиной стенки и рассматривается в рамках плоской деформации.

Возможны два случая: случай проскальзывания на границе между грунтом и тоннельной обделкой и при отсутствии проскальзывания на границе между грунтом и тоннельной обделкой [6, 7, 8, 19, 24, 40, 41, 49, 50, 81, 83, 84, 85, 93].

Формулы для внутренних сил, появляющихся в обделке тоннеля под влиянием сейсмических волн землетрясений ( $T_{max}$  – сила максимального обжатия тоннельной обделки,  $M_{max}$  – максимальный изгибающий момент):

1. Случай полного проскальзывания тоннельной обделки с подкладкой и грунтом, вмещающим тоннель:

$$\frac{\Delta(2R_l)_{max}}{2R_l} = \pm \frac{1}{3} K_1 F \gamma_{max} . \quad (2.6)$$

$$M = \pm K_1 \frac{E_m}{6(1+\nu_m)} R_l^2 \gamma_{max} \cos \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (2.7)$$

$$T = \pm K_1 \frac{E_m}{6(1+\nu_m)} R_l \gamma_{max} \cos \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (2.8)$$

$$M_{max} = \pm K_1 \frac{E_m}{6(1+\nu_m)} R_l^2 \gamma_{max} . \quad (2.9)$$

$$T_{max} = \pm K_1 \frac{E_m}{6(1+\nu_m)} R_l \gamma_{max} , \quad (2.10)$$

где 
$$K_1 = \pm \frac{12(1-\nu_m)}{2F + 5 - 6\nu_m} . \quad (2.11)$$

2. При отсутствии проскальзывания между тоннельной обделкой и грунтом, вмещающим тоннель:

$$T = \pm K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} R_l \gamma_{max} \cos \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right], \quad (2.12)$$

$$T = \pm K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} R_l \gamma_{max} , \quad (2.13)$$

где 
$$K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu_m) - (1-2\nu_m)C] + 2 - \frac{1}{2}C(1-2\nu_m)^2}{F[(3-2\nu_m) - (1-2\nu_m)C] + C \left[ \frac{5}{2} - 8\nu_m + 6\nu_m^2 \right] + 6 - 8\nu_m} . \quad (2.14)$$

Здесь  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты преобразования внутренних усилий на тоннельную обделку под воздействием волн землетрясений. Максимальная деформация сдвига была получена под воздействием волн землетрясений в случае рассмотрения «свободного поля» на основе точного определения напряжённо-деформированного состояния грунтового массива [15, 16, 17, 19].

При воздействии сейсмических волн землетрясений на тоннель деформации, возникающие в тоннельной обделке как результат суперпозиции деформаций изгиба  $\varepsilon_m$  и обжатия  $\varepsilon_r$ , определяются по формулам:

$$\varepsilon_m = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} R_l^2 \frac{\gamma_{\max} t_l}{2E_l I_{l,t}}. \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_r = \pm K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} R_l \frac{\gamma_{\max}}{E_l I_{l,t}}. \quad (2.16)$$

Отметим, что при проскальзывании на границе грунта и тоннельной обделки метод Wang позволяет найти выражение только для максимального обжатия тоннельной обделки  $T_{\max}$ . Ученым Kouretzis G. было предложено необходимое выражение для максимального изгибающего момента [53]:

$$M_{\max} = \pm (2 - K_3 - 2K_4) \tau_{\max} \frac{R_l^2}{2}; \quad (2.17)$$

$$\tau_{\max} = \pm V_{\max} \sqrt{\rho_{\max} G_{\max}}, \quad (2.18)$$

$$\text{где } K_3 = 1 + \frac{(1 - 2\nu_m)(1 - C)F - 0.5(1 - 2\nu_m)C + 2}{[(3 - 2\nu_m) + (1 - 2\nu_m)C]F + [0.5(5 - 6\nu_m)](1 - 2\nu_m)C + (6 - 8\nu_m)}; \quad (2.19)$$

$$K_4 = \frac{[1 + (1 - 2\nu_m)C]F - [0.5(1 - 2\nu_m)C] - 2}{[(3 - 2\nu_m) + (1 - 2\nu_m)C]F + [0.5(5 - 6\nu_m)](1 - 2\nu_m)C + (6 - 8\nu_m)}. \quad (2.20)$$

Здесь  $G_{\max}$  – модуль сдвига материала грунта;  $C = \frac{(1 - \nu_l^2)R_l E_m}{E_l t_l (1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)}$  – коэффициент

передачи напряжений при сжатии;  $F = \frac{(1 - \nu_l^2)R_l^3 E_m}{6E_l t_{l,1}(1 + \nu_m)}$  – коэффициент передачи

напряжений при изгибе.

### 3. Метод Penzien

В случае полного проскальзывания между тоннельной обделкой и массива грунта, вмещающего тоннель, учёные (Penzien J., и др.) составили разрешающие уравнения, получив для них аналитические решения, что позволило определить изгибающие моменты и поперечные силы в тоннельных обделках [77, 78]:

$$T = \pm \frac{6\gamma_{\max} R^{\pi_{\text{roc}}} E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)} \cos \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (2.21)$$

$$M = \pm \frac{3\gamma_{\max} R^{\pi_{\text{roc}}} E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)} \cos \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (2.22)$$

$$V = \pm \frac{12\gamma_{\max} R^{\pi_{\text{roc}}} E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)} \sin \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (2.23)$$

$$\Delta D^{\pi_{\text{roc}}} = R^{\pi_{\text{roc}}} \Delta(2R_l)_{f,f} = R^{\pi_{\text{roc}}} \frac{(2R_l)}{2} \gamma_{\max}. \quad (2.24)$$

$$T_{\max} = \pm \frac{6\gamma_{\max} R^{\pi_{\text{roc}}} E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)}. \quad (2.25)$$

$$M_{\max} = \pm \frac{3\gamma_{\max} R^{\pi_{\text{roc}}} E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)}. \quad (2.26)$$

$$V_{\max} = \pm \frac{12\gamma_{\max} R^{\pi_{\text{roc}}} E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)}, \quad (2.27)$$

где 
$$R = \pm \frac{4(1-\nu_m)}{\alpha^{\pi_{\text{roc}}} + 1}; \quad (2.28)$$

$$\alpha^{\pi_{\text{roc}}} = \frac{12E_l I_{l,1} (5-6\nu_m)}{(2R_l)^3 G_m (1-\nu_l^2)}. \quad (2.29)$$

Внутренние силы возникают в тоннельной оболочке при условии отсутствия проскальзывания на границе тоннельной обделки и вмещающего её массива грунта:

$$\Delta D^{\pi_{\text{roc}}} = R \Delta(2R_l)_{f,f} = R \frac{(2R_l)}{2} \gamma_{\max}. \quad (2.30)$$

$$T_{\max} = \pm \frac{12\gamma_{\max} R E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)}. \quad (2.31)$$

$$M_{\max} = \pm \frac{3\gamma_{\max} R E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)}. \quad (2.32)$$

$$V_{\max} = \pm \frac{12\gamma_{\max} R E_l I_{l,1}}{(2R_l)^2 (1-\nu_l^2)}. \quad (2.33)$$

где

$$R = \pm \frac{4(1-\nu_m)}{\alpha + 1}, \quad (2.34)$$

$$\alpha = \frac{24E_l I_{l,1} (3-4\nu_m)}{(2R_l)^3 G_m (1-\nu_l^2)}. \quad (2.35)$$

Здесь  $V_{\max}$  – максимальная поперечная сила в тоннельной обделке.

#### 4. Метод HRM

Во многих существующих методиках расчётов напряженного состояния не учитывают эмпирические поправки, касающиеся неоднородности обделки тоннеля: методики работают с упругим однородным материалом тоннельных колец, между которыми нет стыков.

Для того чтобы методы расчета воздействия землетрясения на обделок тоннеля соответствовали действительности, необходим коэффициент жесткости при изгибе, чтобы отразить влияние стыков в тоннельной обделке (учитывающим наличие стыков) [37, 40, 65, 71, 72, 79, 80, 81, 84, 90, 92, 108]:

$$\eta = \frac{(EI)_{eq}}{EI}, \quad (2.36)$$

где  $\eta$  – понижающий коэффициент жесткости при изгибе;  $(EI)_{eq}$  – жесткость поперечного сечения обделки при изгибе при наличии стыков;  $EI$  – жесткость поперечного сечения обделки при изгибе без стыков.

Коэффициент сопротивления дается для расчета напряженного состояния в обделке тоннеля, когда тоннель находится в грунте под воздействием землетрясения:  $K_s \leq 30000 \text{ кН/м}^3$ , вводится коэффициент  $\lambda$  – отношение изгибной жесткости поперечного сечения стыка к изгибной жесткости поперечного сечения сборной тоннельной обделки:

$$\lambda = K_{\theta} l / EI, \quad (2.37)$$

где  $K_{\theta}$  – изгибная жесткость стыка (на единицу длины);  $l$  – длина элемента расчета (стыка), обычно принимается равной 1 м. Коэффициент жесткости  $\eta$  находятся в

интервале 0,1 – 0,4 [14, 37, 40, 59, 60, 65, 71, 72, 74, 106].

В расчетном методе [37] все используемые факторы, влияющие на величину эффективного коэффициента жесткости  $\eta$ , сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Факторы, влияющие на коэффициент жесткости  $\eta$

Фактор	Эффективный коэффициент жесткости, $\eta$
Коэффициент, $\lambda$	Чувствителен
Коэффициент сопротивления грунта, $K_s$	Не чувствителен при $K_s < 300000$ кН/м <sup>3</sup>
Количество стыков	Чувствителен
Толщина обделки	Зависит от общего количества стыков
Радиус тоннеля	Чувствителен
Снижение жесткости стыка	Чувствителен

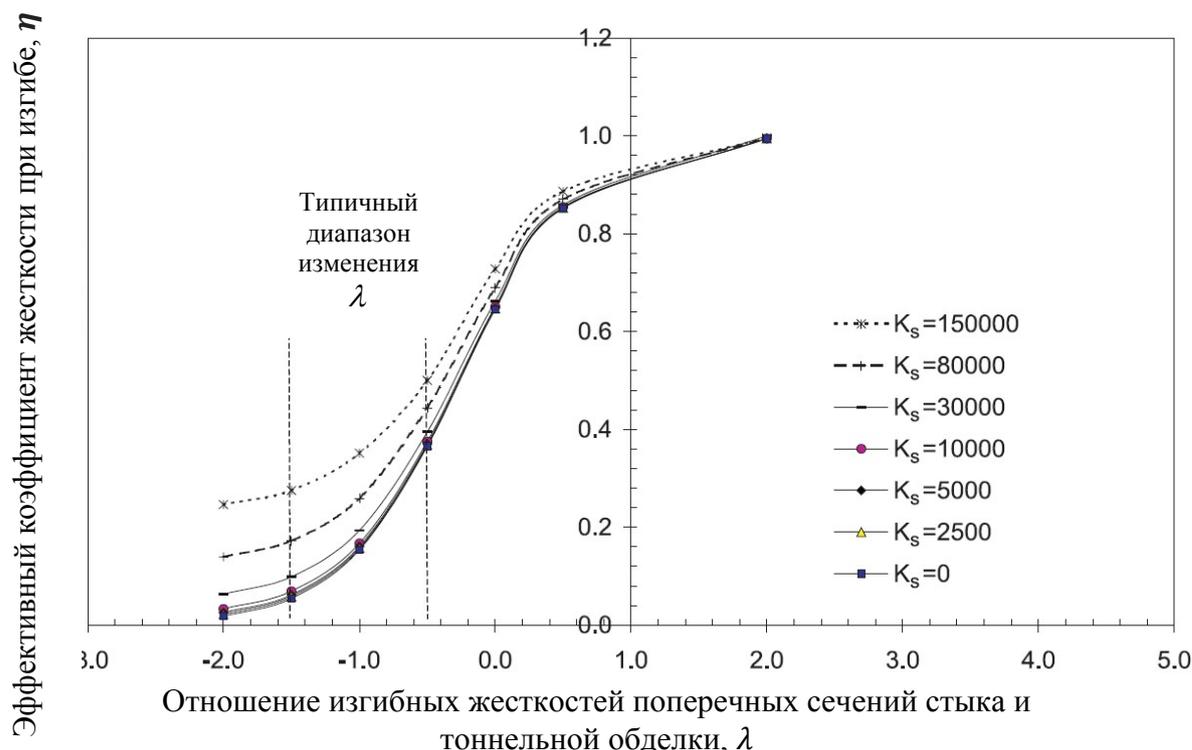


Рисунок 2.3 – Зависимости эффективного коэффициента жесткости при изгибе  $\eta$  от коэффициента  $\lambda$  при различных значениях коэффициентов сопротивления грунта [37]

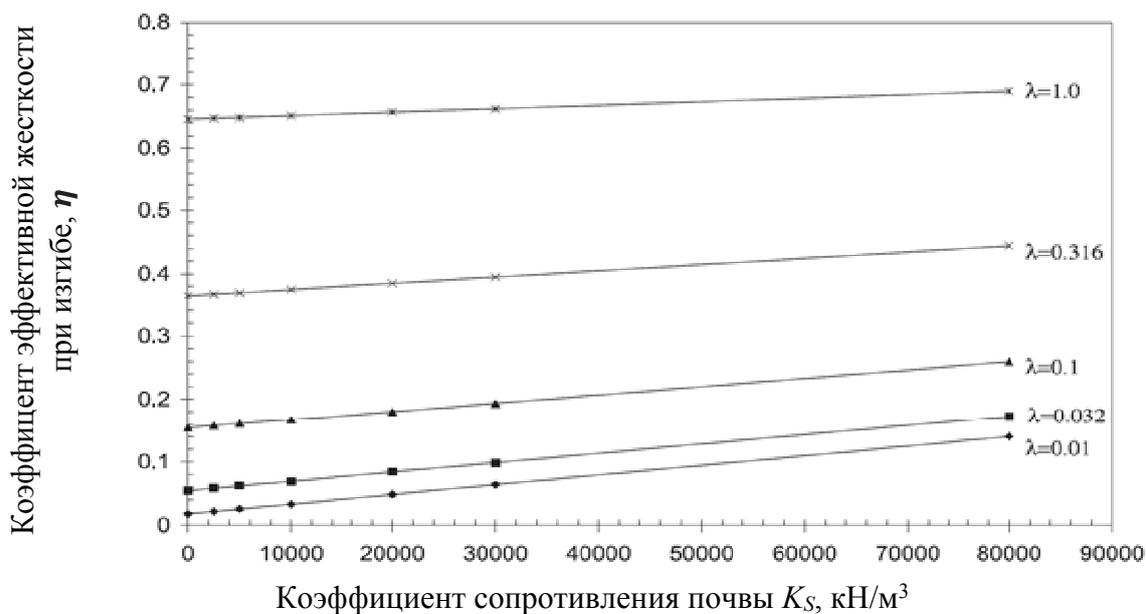


Рисунок 2.4 – Зависимости коэффициента эффективной жесткости при изгибе  $\eta$  от коэффициента сопротивления грунта  $K_s$  при различных коэффициентах  $\lambda$

В работе [27, 37, 59, 60, 80] предложена формула для нахождения понижающего коэффициента  $\eta$ , которая может быть применена для определения жёсткости при изгибе полного непрерывного кольца при наличии стыков в обделке тоннеля:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{3}{4} \frac{t^3}{l_t^2} (C_x^* + C_y^*)} , \quad (2.38)$$

где  $C_x^* = \sum_{\substack{\beta_i < \frac{\pi}{2} \\ -\frac{\pi}{2} < \beta_i}} \cos(\beta_i) \cos(2\beta_i)$  и  $C_y^* = \sum_{\substack{\beta_i < \pi \\ 0 < \beta_i}} \sin(\beta_i) \cos(2\beta_i)$ ;  $\beta_i$  – угол  $i$ -го стыка, измеренный

от пика тоннеля;  $l_t$  – продольная длина стыка;  $t$  – толщина обделки,  $R$  – радиус тоннеля. Графическая интерпретация формулы (2.38) приведена на рисунке 2.5.

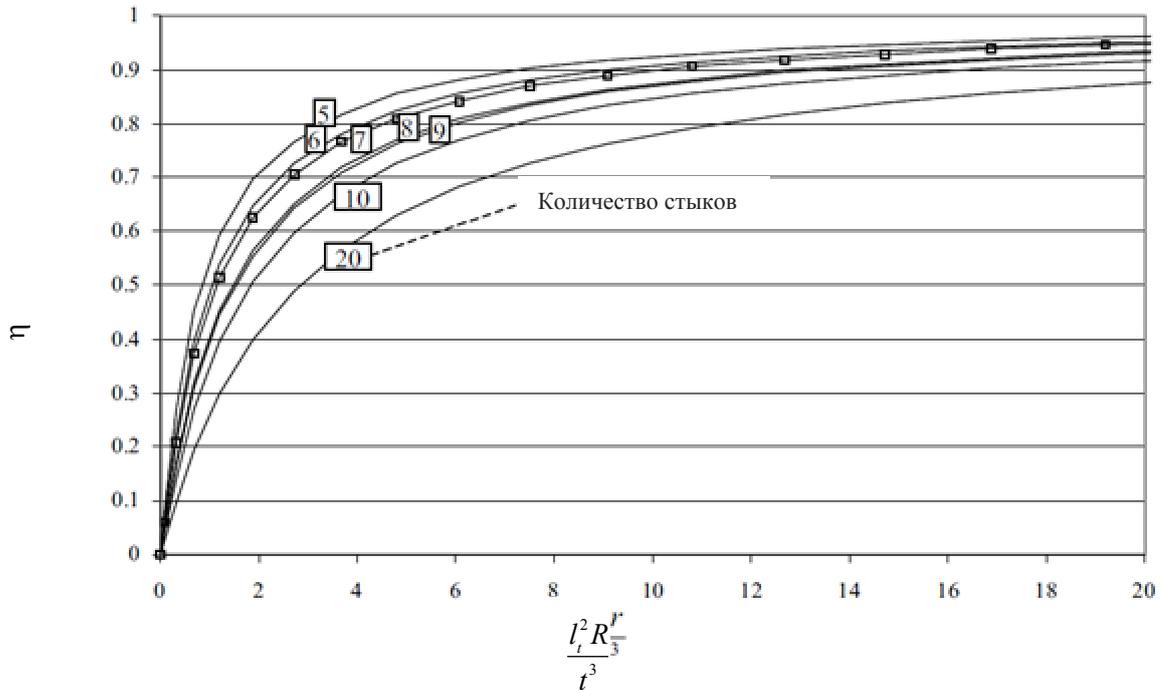


Рисунок 2.5 – Зависимость понижающего коэффициента жесткости  $\eta$  от безразмерного параметра  $(\frac{l_t^2 R}{t^3})$  при наличии стыков для одного кольца обделки

Согласно Muir Wood A.M., [62] и Lyons A.C., [56], эффективная жесткость поперечного сечения обделок тоннеля состоит из соединений, рассчитанных по следующей формуле:

$$I_e = \sum_{j=1}^n I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \cdot I, \quad (2.39)$$

где  $I_e < I$  и  $n > 4$ ;  $I$  – жесткость поперечного сечения тоннельной обделки без стыков;  $I_j$  – изгибная жесткость поперечного сечения  $j$ -го стыка;  $I_e$  – эффективная жесткость поперечного сечения обделки.

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., [37]). 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). Таким образом, глобальная матрица жесткости в рассматриваемой работе получена с учетом локальных матриц жесткости каждого отдельного сегмента кольца (балки-элемента) исследуемой строительной конструкции.

В методе HRM (расчетная схема приведена на рисунке 2.6) учитываются взаимосвязи между смещением, жесткостью и внутренней силой каждой части обделки в локальной системе координат для перехода к глобальной системе координат. При определении перемещения элементов анти-оболочки можно получить и внутренние усилия в обделке тоннеля.

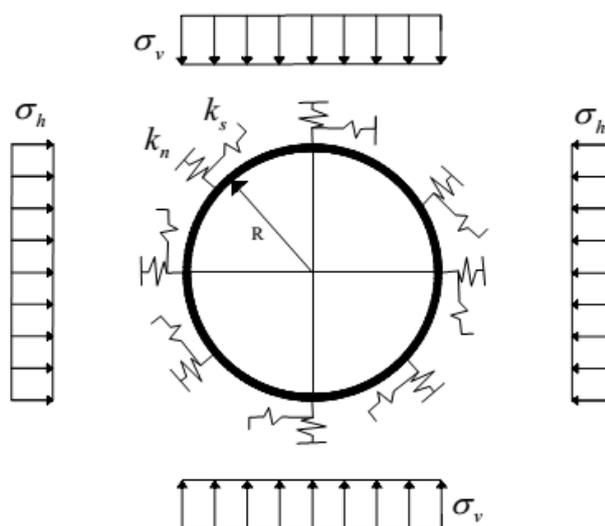


Рисунок 2.6 – Расчетная схема метода HRM:  $R$  – радиус обделки тоннеля;  $E_s$  – модуль упругости тоннельной обделки;  $k_n$  – коэффициент нормальной жесткости пружин;  $k_s$  – коэффициент касательной жесткости пружин;  $\sigma_v$  – вертикальное напряжение;  $\sigma_h$  – горизонтальное напряжение [37, 71, 72]

Чтобы определить перемещений обделок тоннеля под воздействием землетрясения, определите матрицу глобальной жесткости всей обделки тоннеля и соединения грунтовой среды вокруг тоннеля. Глобальная матрица жесткости рассчитывается через матрицу локальной жесткости каждого отдельного элемента каждого отдельного элемента кольца (балки-элемент) (рисунок 2.7).

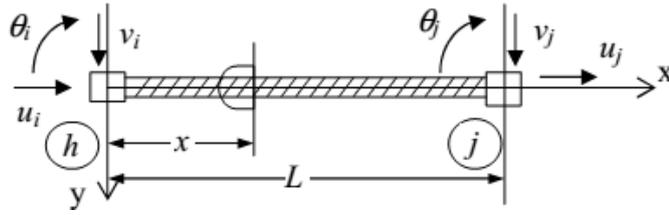


Рисунок 2.7 – Схема расчёта перемещения элемента кольца  
(балки-элемента) обделки

Исходя из работ [37, 42, 44, 72], имеем выражение

$$Z_i S_i = G_i + R_i, \quad (2.40)$$

где  $Z_i$  – местная матрица жесткости для элемента  $i$ ;

$S_i$  – вектор – перемещение в узлах  $h$  и  $j$  элемента  $i$ , в локальной системе координат  $S_i = [u_{h,i}, v_{h,i}, \theta_{h,i}, u_{j,i}, v_{j,i}, \theta_{j,i}]$ .

Здесь  $u, v$  – осевое и поперечное перемещения соответственно;  $\theta$  – угол вращения элемента в соответствующих узлах;  $G_i, R_i$  – внешние узловые силы соседних узлов элемента:

$$\begin{cases} G_i^T = [G_{xh,i}, G_{yh,i}, G_{zh,i}, G_{xj,i}, G_{yj,i}, G_{zj,i}]^T \\ R_i^T = [R_{xh,i}, R_{yh,i}, R_{zh,i}, R_{xj,i}, R_{yj,i}, R_{zj,i}]^T \end{cases}, \quad (2.41)$$

где  $G_{xh,i}, G_{yh,i}, G_{zj,i}$  – продольная сила, поперечная сила и изгибающий момент в начальном узле  $h$  элемента  $i^{\text{th}}$ ;  $R_{xh,i}, R_{yh,i}, R_{zh,i}$  – продольная сила, поперечная сила и изгибающий момент в конечном узле  $j$  элемента  $i^{\text{th}}$ .

В итоге получим матричное уравнение (2.42):

$$\begin{bmatrix} \frac{E.A}{L_i} & 0 & 0 & -\frac{E.A}{L_i} & 0 & 0 \\ & \frac{12.E.J}{L_i^3} & \frac{6.E.J}{L_i^2} & 0 & -\frac{12.E.J}{L_i^3} & \frac{6.E.J}{L_i^2} \\ & & \frac{4.E.J}{L_i} & 0 & -\frac{6.E.J}{L_i^2} & \frac{2.E.J}{L_i} \\ & & & \frac{E.A}{L_i} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{12.E.J}{L_i^3} & -\frac{6.E.J}{L_i^2} \\ & & & & & \frac{4.E.J}{L_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{h,i} \\ v_{h,i} \\ \theta_{h,i} \\ u_{j,i} \\ v_{j,i} \\ \theta_{j,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xh,i} + G_{xh,i} \\ R_{yh,i} + G_{yh,i} \\ R_{zh,i} + G_{zh,i} \\ R_{xj,i} + G_{xj,i} \\ R_{yj,i} + G_{yj,i} \\ R_{zj,i} + G_{zj,i} \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

В глобальной декартовой системе координат смещение узла  $q_{h^+j,i}$  связано с вектором-смещением  $S_i$  матричным выражением:

$$S_i = \lambda_i q_{h^+j,i}, \quad (2.43)$$

где

$$q_{h^+j,i} = \begin{bmatrix} w_{h,i} \\ z_{h,i} \\ \varphi_{h,i} \\ w_{j,i} \\ z_{j,i} \\ \varphi_{j,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_i \\ q_{i+1} \end{bmatrix}; \quad (2.44)$$

$$\lambda_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_i & \sin \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.45)$$

Здесь  $q_{h^+j,i}$  – вектор узловых перемещений элемента  $i$ ;  $q_i$  – вектор узловой перемещения узла  $i$ ;  $w$  и  $z$  – перемещения вдоль оси “х” и вдоль оси “у” глобальной декартовой системы координат;  $\varphi$  – вращение узла в глобальной декартовой системе координат;  $\alpha$  – угол, который образует локальная декартова система координат элемента  $i$  по отношению к глобальной декартовой системе координат.

Таким же образом, в глобальной декартовой системе координат узловые силы определяются следующими выражениями в матричной форме:

$$G_i = \lambda_i F_{h^+j,i}; \quad (2.46)$$

$$R_i = \lambda_i Q_{h^+j,i}, \quad (2.47)$$

где

$$F_{h^+j,i} = \begin{bmatrix} F_{xh,i} \\ F_{yh,i} \\ M_{h,i} \\ F_{xj,i} \\ F_{yj,i} \\ M_{j,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_i \\ F_{i+1} \end{bmatrix}; \quad Q_{h^+j,i} = \begin{bmatrix} Q_{xh,i} \\ Q_{yh,i} \\ Q_{Mh,i} \\ Q_{xj,i} \\ Q_{yj,i} \\ Q_{Mj,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_i \\ -Q_{i+1} \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

Окончательно получим матричное уравнение в глобальной декартовой системе координат:

$$k_i q_{h=j,i} = F_{h=j,i} + Q_{h=j,i}, \quad (2.49)$$

где  $k_i$  – локальная матрица жесткости элемента  $i$  в глобальной декартовой системе координат:

$$k_i = \lambda_i^T Z_i \lambda_i \quad (2.50)$$

Локальные матрицы жесткости элементов собраны в глобальную матрицу жесткости рассматриваемой конструкции с использованием критериев работы последней [37].

Таким образом, в конце этого этапа вычислений получена матрица глобальной жесткости  $K$ . Размерность данной матрицы  $(3n) \times (3n)$ , где  $n$  – общее число узлов. Векторы перемещений  $q$  и узловых сил  $F$ , оба из которых состоят из  $(3n)$  элементов, еще не определены. Следует отметить, что локальная матрица жесткости последнего элемента должна быть связана с соответствующей матрицей жесткости первого элемента.

$$\text{В матричном виде имеем} \quad Kq = F \quad (2.51)$$

или

$$\begin{bmatrix} (k_{n,a} + k_{1,a}) & k_{1,b} & 0 & 0 & 0 & k_{n,c} \\ k_{1,c} & (k_{1,d} + k_{2,a}) & k_{2,b} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{2,c} & (k_{2,d} + k_{3,a}) & k_{3,b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{3,c} & (k_{3,d} + k_{4,a}) & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & k_{n-1,b} \\ k_{n,b} & 0 & 0 & 0 & k_{n-1,c} & (k_{n-1,d} + k_{n,a}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ \dots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix}, \quad (2.52)$$

где матрица жесткости  $k_i$  элемента  $i$  имеет вид:

$$k_i = \begin{bmatrix} k_{i,a} & k_{i,b} \\ k_{i,c} & k_{i,d} \end{bmatrix}, \quad (2.53)$$

$q_1, q_2, \dots, q_n$  – трехкомпонентные векторы перемещений (три смещения каждого узла);

$F_1, F_2, \dots, F_n$  – трехкомпонентные векторы узловых сил (три внешние силы, приложенные к каждому узлу).

Наличие нормальных и касательных пружин в узлах (рисунок 2.8) рассматриваемой строительной конструкции вызывает изменения жесткостей в структурных элементах в соответствующих направлениях. Эти изменения принимаются во внимание при модификации соответствующих элементов вдоль диагонали локальной матрицы жесткости каждого элемента, а затем в глобальной матрице жесткости по формулам:

$$\begin{cases} K_{3i-2,3i-2}^* = K_{3i-2,3i-2} + k_{n,i} \cos 2\left(\frac{\alpha_{i+2}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2}\right) + k_{s,i} \sin 2\left(\frac{\alpha_{i+2}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2}\right); \\ K_{3i-1,3i-1}^* = K_{3i-1,3i-1} + k_{n,i} \sin 2\left(\frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2}\right) + k_{s,i} \cos 2\left(\frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2}\right); \\ K_{3i-1,3i-2}^* = K_{3i-1,3i-2} + (k_{n,i} - k_{s,i}) \sin\left(\frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2}\right); \\ K_{3i-2,3i-1}^* = K_{3i-2,3i-1} + (k_{n,i} - k_{s,i}) \sin\left(\frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2}\right). \end{cases} \quad (2.54)$$

где  $i$  – общее количество узлов;  $k_{n,i}$  – жесткость нормальной пружины взаимодействия узла ввода  $i$ ;  $k_{s,i}$  – жесткость касательной пружины взаимодействия узла ввода  $i$ ;  $\alpha_i, \alpha_{(i+1)}$  – углы между локальной и глобальной системами координат для элемента  $i$  и элемента  $(i+1)$ .

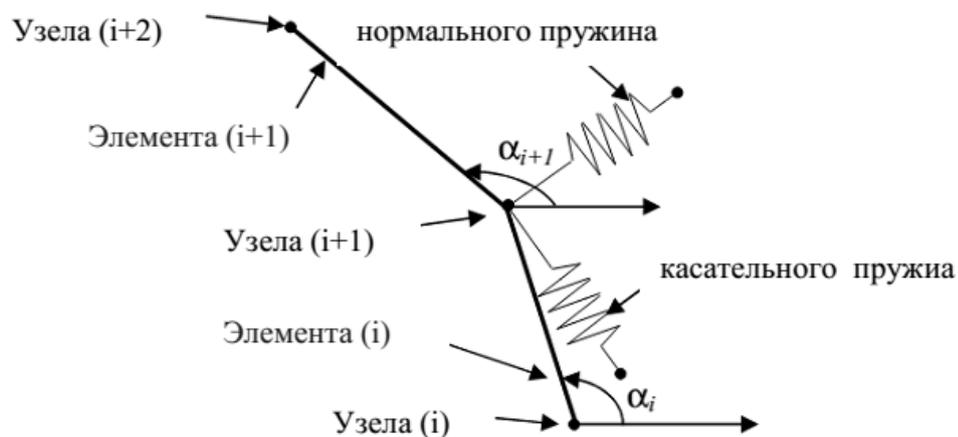


Рисунок 2.8 – Взаимодействие грунта и обделки по Winkler – пружинами соединены узлы обделки [37]

Силы взаимодействия  $T_i$  можно сразу определить в узлах с помощью локальной матрицы жесткости:

$$T_i = Z_i S_i . \quad (2.55)$$

Грунт взаимодействует с конструкцией тоннеля двумя способами: с помощью нормальных пружин и касательных пружин, соединенных с узлами рассматриваемой структуры (рисунок 2.7) и с активными нагрузками. Нормальные пружины позволяют определить реакции давления на грунт, смоделированные при деформировании под действием приложенных активных нагрузок и направленные нормально к движению грунта. Касательные пружины позволяют определить тангенциальные деформации конструкций в направлении по окружности под действием приложенных активных нагрузок, которые необходимо принять во внимание. Значения жесткостей нормальных пружин ( $k_n$ ) и касательных пружин ( $k_s$ ) могут определяться на основе нормальной жесткости грунта ( $\eta_n$ ) и касательной жесткости грунта ( $\eta_s$ ).

В отличие от других способов расчета, в которых жесткость грунта рассматривается как постоянное значение, так и постоянные геомеханические параметры грунта, такие как модуль упругости –  $E_s$  и коэффициент Пуассона –  $\nu_s$ , в работе на основе результатов исследований Oreste P.P. [71, 72] была введена нелинейная (гиперболическая) зависимость между давлением  $p$  и опорной реакцией (деформацией грунта)  $\delta$ :

$$p = p_{lim} \left( 1 - \frac{p_{lim}}{p_{lim} + \eta_0 \delta} \right), \quad (2.56)$$

где  $p_{lim}$  – максимально существующее давление реакции грунта;  $\eta_0$  – начальная жесткость грунта (при значениях  $\delta$ , близких к 0). Проводя эксперимент погружения пластины в грунт, можно получить кривую "нагрузка – смещение", вид которой аналогичен гиперболической зависимости.

Необходимая жесткость ( $\eta$ ) грунта, определяемая отношением  $p/\delta$ , может быть получена для каждого узла опорной конструкции, то есть имеем:

$$\eta = \frac{p_{lim}}{\delta} \left( 1 - \frac{p_{lim}}{p_{lim} + \eta_0 \delta} \right); \quad \eta_s = \frac{1}{3} \eta_n . \quad (2.57)$$

Нелинейное соотношение будет применяться как к нормальной жесткости грунта ( $\eta_n$ ), так и к тангенциальной жесткости ( $\eta_s$ ) грунта в данном исследовании. Для кругового тоннеля в упругом грунте под действием осесимметрической нагрузки реакция опоры зависит только от радиуса тоннеля и геомеханических параметров грунта. Для этого случая применима следующая эмпирическая формула, полученная До Н.А. [37]. Тогда для определения начальной нормальной жесткости грунта имеем:

$$\eta_{n,0} = \beta \frac{1}{1+\nu_s} \frac{E_s}{R}; \quad \eta_{s,0} = \frac{1}{3} \eta_{n,0} \quad (2.58)$$

где  $\nu_s$  – коэффициент Пуассона грунта;  $E_s$  – модуль упругости грунта;  $\beta$  – безразмерный множитель;  $R$  – радиус тоннеля;  $\eta_{n,0}$  – начальная нормальная жесткость грунта;  $\eta_{s,0}$  – начальная тангенциальная жесткость грунта.

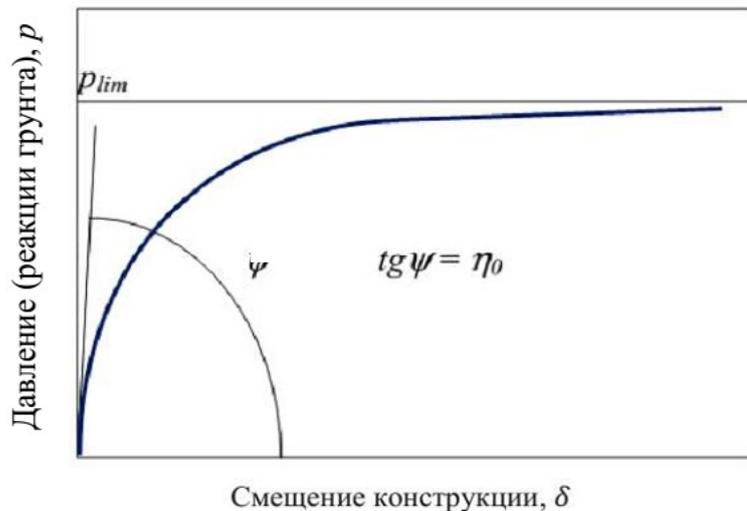


Рисунок 2.9 – Нелинейная зависимость между давлением реакции грунта и смещением конструкции [37]

Расчет активных нагрузок:

Активная вертикальная нагрузка  $\sigma_v$  может быть оценена с помощью формулы Терцаги [37]. Если толщина покрывающего слоя грунта в два раза больше диаметра  $D$  тоннеля, то есть эффективная толщина вскрыши  $H_0$  ( $H_0 \geq 2D$ ),

то следует использовать для определения  $H_0$  следующую формулу (Takano Y. H., [88]):

$$H_0 = \frac{B_1(1 - (\frac{c}{B_1\gamma_s}))}{K \operatorname{tg} \phi} (1 - e^{-K \operatorname{tg} \phi (\frac{H}{B_1})}) + \frac{P_0}{\gamma_s} (e^{-K \operatorname{tg} \phi (\frac{H}{B_1})}); \quad (2.59)$$

$$B_1 = R_0 \operatorname{ctg}(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}), \quad (2.60)$$

где  $c$ ,  $\phi$  и  $\gamma_s$  – коэффициент сцепления грунта, угол внутреннего трения и удельный вес грунта, соответственно;  $K$  – отношение горизонтального давления грунта к вертикальному давлению грунта (обычно равен 1.0, но может быть принят в качестве значения по формуле Takano Y.H. [88]);  $H$  – глубина залегания тоннеля.

Итак, имеем формулу

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v, \quad (2.61)$$

где горизонтальная нагрузка  $\sigma_h$ , как правило, составляет определенный процент от вертикальной нагрузки, в зависимости от коэффициента бокового распора грунта  $K_0$ .

#### Расчёт по новому варианту метода HRM

Более подробную информацию о новом варианте метода HRM можно найти в работе Do N.A. [37].

Соединения в сегментной конструкции представляют собой промежуточное состояние между двумя крайними случаями: шарнирное соединение и жесткое соединение. В новом варианте метода HRM соединения сегментных обделок по полужесткому соединению: "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 ( $0 < r < 1$ ). Главной характеристикой полужесткого соединения является непрерывное изменение вращательной жесткости под действием нагрузок.

В настоящее время в научных исследованиях используются две модели для имитации сегментного совместного соединения. Первая из них является линейной (самая простая модель соединения); вторая модель – нелинейная имитирующая сегментное совместное соединение на основе непрерывного изменения вращательного значения жесткости строительной конструкции.

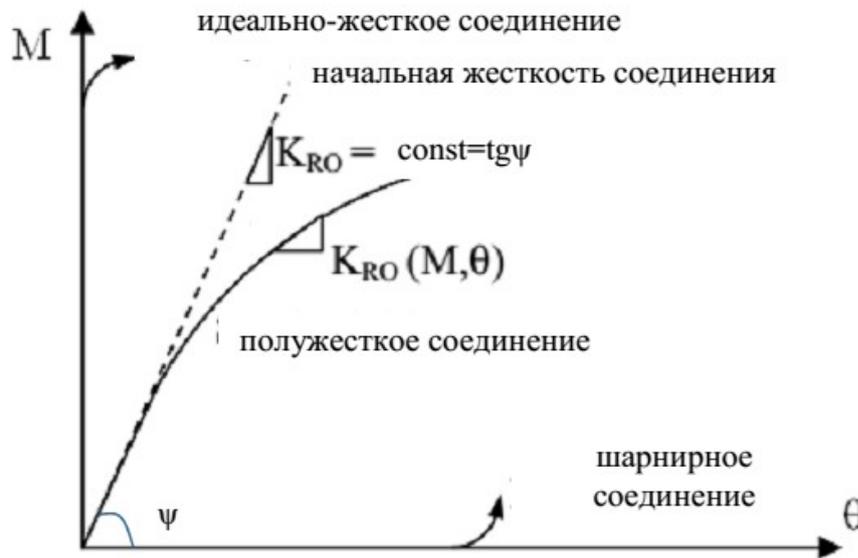


Рисунок 2.10 – Зависимость  $M$ - $\theta$  для полужесткого соединения [37]

#### *Фактор неподвижности*

В работе Burns S.A., [32] 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:

$$r_i = \frac{1}{1 + \frac{3E_s J_s}{K_{RO} L_i}}, \quad (2.62)$$

где  $K_{RO}$  – вращательная жесткость пружины концевое соединения;  $E_s$  – модуль Юнга материала;  $J_s$  – момент инерции балки-элемента;  $L_i$  – длина балки-элемента.

Как известно, 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 ( $0 < r < 1$ ).

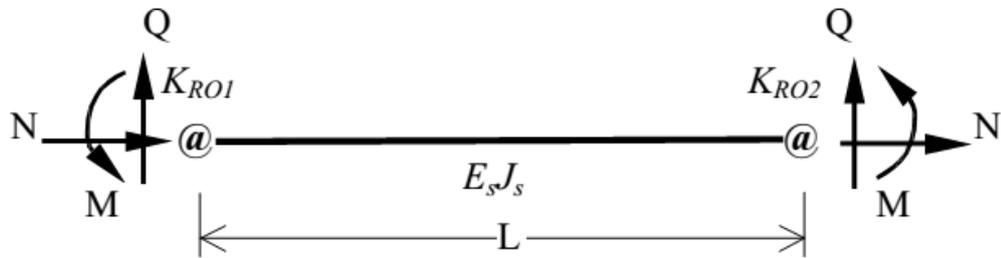


Рисунок 2.11 – Полужёсткое соединение [32, 37, 71, 72]

### Матрица жесткости полужесткого соединения

На основе существующей расчетной схемы необходимо ввести лишь незначительные изменения в матрицу жесткости балки-элемента.

Матрица жесткости  $i$ -го балки-элемента при наличии жестких концевых соединений может быть преобразована с помощью матрицы коррекции по формуле [32, 37, 71, 72]:

$$K_i^{SR} = Z_i C_i, \quad (2.63)$$

где  $K_i^{SR}$  – матрица жесткости полужесткого соединения балки-элемента  $i$ ;  $Z_i$  – матрица жесткости балки-элемента  $i$ , имеющего полностью жесткие соединения концов;  $C_i$  – коррекционная матрица (матрица коррекции):

$$C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4r_2 - 2r_1 + r_1 r_2}{4 - r_1 r_2} & \frac{-2L_i r_1 (1 - r_2)}{4 - r_1 r_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6(r_1 - r_2)}{L_i (4 - r_1 r_2)} & \frac{3r_1 (2 - r_2)}{4 - r_1 r_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4r_1 - 2r_2 + r_1 r_2}{4 - r_1 r_2} & \frac{2L_i r_2 (1 - r_1)}{4 - r_1 r_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6(r_1 - r_2)}{L_i (4 - r_1 r_2)} & \frac{3r_2 (2 - r_1)}{4 - r_1 r_2} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

где  $L_i$  – длина балки-элемента  $i$ .

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

Работы Oreste P.P. [71, 72], Do N.A. [37] описывают использование метода HRM для расчета напряженного состояния тоннельных обделок. Данный метод включает себя внедрение понижающего коэффициента в отношении жёсткости изгиба тоннельных колец. Такой подход косвенно нивелирует влияние стыков на изгибную жёсткость, а следовательно точность расчётов.

Существует также модификация метода HRM [37, 71, 72], в котором стыки колец описываются полужёстким соединением. Это значит, что изгибная жесткость с изменением нагрузок варьируется непрерывно.

В другой разновидности метода HRM [42, 44, 71, 72] описываются активные нагрузки, приходящиеся на тоннельную обделку. Метод также включает в себя сдвиговые напряжения и деформации, возникающие на протяжении сейсмической активности в элементах обделки. Напряжения сдвига при этом обуславливаются энергией горизонтальных поперечных волн [63, 64, 78].

В работе напряжение сдвига оценивалось по формуле:

$$\tau = G\gamma_c, \quad (2.65)$$

где  $G$  – модуль сдвига грунта, МПа;  $\gamma_c$  – 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

разниться в предложенном методе HRM и расчётной методике Naggar H.E. [61, 63] под воздействием сейсмических волн. На основе используемой схемы действия сейсмических нагрузок волн землетрясений на обделку тоннеля в методе HRM (рисунок 2.12) горизонтальные нагрузки действуют в противоположных направлениях, а все внешние нагрузки поворачиваются против часовой стрелки на угол, равный  $\frac{\pi}{4}$ .

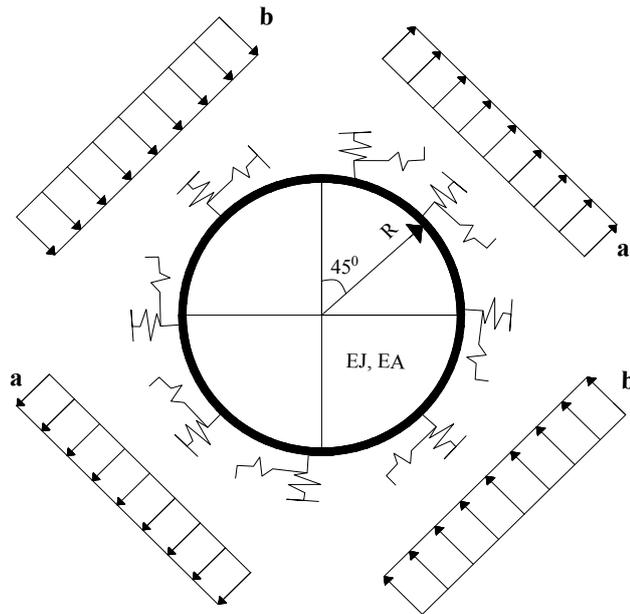


Рисунок 2.12 – Параметры внешних сил **a** и **b** для учета сейсмического воздействия на обделку тоннеля в методе HRM [14, 37, 42, 44]

Параметры **a** и **b**, представленные на рисунке 2.12, были введены для учета внешних нагрузок при сейсмическом воздействии при реализации метода HRM [14, 37, 44].

При анализе и расчете значений параметров «**a**» и «**b**» необходимо учитывать влияние внешней нагрузки, которая вызвана сейсмическим напряжением сдвига  $\tau$ , привел к следующим результатам: параметр «**b**» равен  $1.25\tau$ ; параметр «**a**» зависит от радиуса  $R$  тоннеля и оценивается следующим выражением:

$$\mathbf{a} = (-0.7 \ln(R) + 0.885) \tau \quad (2.66)$$

где  $R$  – радиус тоннеля, м.

### 2.3 Расчет обделок тоннелей метрополитена под воздействием сейсмических волн землетрясений, направленных вдоль оси тоннелей

Метод, основанный на совпадении деформаций обделок тоннеля с деформациями «свободного поля». Этот метод не принимает во внимание существование в отдельности тоннеля и его обделки в грунте. В методе производится оценка ожидаемой деформации всей строительной конструкции для случая, если жесткость обделки тоннеля метрополитена меньше жесткости грунтового массива, вмещающего тоннель.

Для того, чтобы прогнозировать изменение формы, устойчивости и рассчитывать напряженные состояния зданий и сооружений, в расчетах пользуются полями деформаций, напряжений и перемещений, которые рассматриваются при движении сейсмических волн в однородных, изотропных и упругих средах [19, 24, 49, 50]. На основе уравнения, описывающего движение горных пород в процессе распространения плоской волны в направлении оси  $O_x$ , возможно рассчитать продольную деформацию  $\frac{\partial u}{\partial x}$  и кривизна  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$  в направлении распространения волны:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{C} \frac{\partial u}{\partial t}, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2.67)$$

где  $\frac{\partial u}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$  – скорость и ускорение движения горных пород;  $t$  – время;  $C$  – скорость распространения волны.

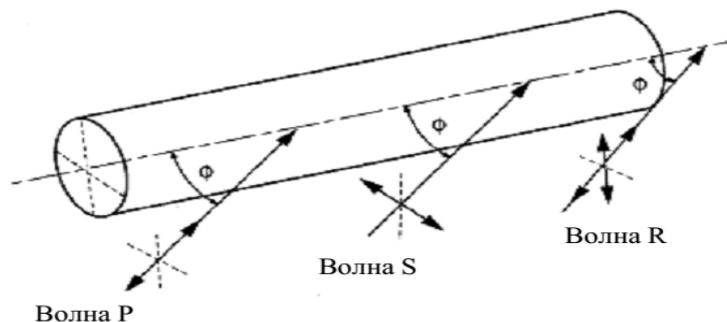


Рисунок 2.13 – Сейсмические волны, вызывающие продольные осевые и изгибные деформации [24, 49, 50]

В таблице 2.5 отображены формулы [24, 49, 50], позволяющие вычислить значения деформаций и кривизны, возникающих под действием разных типов сейсмических волн (рисунок 2.13), где введены обозначения:  $V_{RP}$  – пиковое значение скорости колебания частиц при распространении  $R$ -волн вблизи тоннеля;  $A_R$  – пиковое значение ускорения колебания частиц при распространении  $R$  – волн вблизи тоннеля;  $C_R$  – скорость распространения  $R$  – волн вблизи тоннеля;  $Y$  – расстояние от нейтральной оси поперечного сечения тоннеля до удаленной фибры;  $\varphi$  – угол между направлением распространения волны в горизонтальной плоскости и осью тоннеля (угол падения).

Таблица 2.5 – Осевые и изгибные деформации, возникающие под действием разных типов сейсмических волн [19, 24, 50]

Типы волн		Осевые деформации	Поперечные деформации	Деформации сдвига	Кривизны
Р-волны		$\varepsilon_l = \frac{V_P}{c_P} \cos^2 \varphi$ $\varepsilon_{lm} = \frac{V_P}{c_P} \text{ для } \varphi = 0^\circ$	$\varepsilon_n = \frac{V_P}{c_P} \sin^2 \varphi$ $\varepsilon_{nm} = \frac{V_P}{c_P} \text{ для } \varphi = 90^\circ$	$\gamma = \frac{V_P}{c_P} \sin \varphi \cos \varphi$ $\gamma_m = \frac{V_P}{2c_P} \text{ для } \varphi = 45^\circ$	$\frac{1}{\rho} = \frac{a_P}{c_P^2} \sin \varphi \cos^2 \varphi$ $\frac{1}{\rho_m} = 0,385 \frac{a_P}{c_P^2}$ $\text{для } \varphi = 35^\circ 16'$
S-волны		$\varepsilon_l = \frac{V_S}{c_S} \sin \varphi \cos \varphi$ $\varepsilon_{lm} = \frac{V_S}{2c_S} \text{ для } \varphi = 45^\circ$	$\varepsilon_n = \frac{V_S}{c_S} \sin \varphi \cos \varphi$ $\varepsilon_{nm} = \frac{V_S}{2c_S} \text{ для } \varphi = 45^\circ$	$\gamma = \frac{V_S}{c_S} \cos^2 \varphi$ $\gamma_m = \frac{V_S}{c_S} \text{ для } \varphi = 0^\circ$	$K = \frac{a_S}{c_S^2} \cos^3 \varphi$ $K_m = \frac{a_S}{c_S^2} \text{ для } \varphi = 0^\circ$
Волны Рэлея	Деформации сжатия	$\varepsilon_l = \frac{V_{RP}}{c_R} \cos^2 \varphi$ $\varepsilon_{lm} = \frac{V_{RP}}{c_R} \text{ для } \varphi = 0^\circ$	$\varepsilon_n = \frac{V_{RP}}{c_R} \sin^2 \varphi$ $\varepsilon_{nm} = \frac{V_{RP}}{c_R} \text{ для } \varphi = 90^\circ$	$\gamma = \frac{V_{RP}}{c_R} \sin \varphi \cos \varphi$ $\gamma_m = \frac{V_{RP}}{2c_R} \text{ для } \varphi = 45^\circ$	$K = \frac{a_{RP}}{c_R^2} \sin \varphi \cos^2 \varphi$ $K_m = 0,385 \frac{a_{RP}}{c_R^2}$ $\text{для } \varphi = 35^\circ 16'$
	Деформации сдвига		$\varepsilon_n = \frac{V_{RS}}{c_R} \sin \varphi$ $\varepsilon_{nm} = \frac{V_{RS}}{c_R} \text{ для } \varphi = 90^\circ$	$\gamma = \frac{V_{RS}}{c_R} \cos \varphi$ $\gamma_m = \frac{V_{RS}}{c_R} \text{ для } \varphi = 0^\circ$	$K = \frac{a_{RS}}{c_R^2} \cos^2 \varphi$ $K_m = \frac{a_{RS}}{c_R^2} \text{ для } \varphi = 0^\circ$

Известно, что S-волны обычно создают наибольшие напряжения, поэтому для расчёта полей деформаций, напряжений и перемещений S-волны исследуют в первую очередь. Рассмотрим тоннельную конструкцию, на которую оказывает воздействие поперечная волна, имеющая форму синусоиды, длину  $L$  и амплитуду  $D$ , как показано на рисунке 2.14.

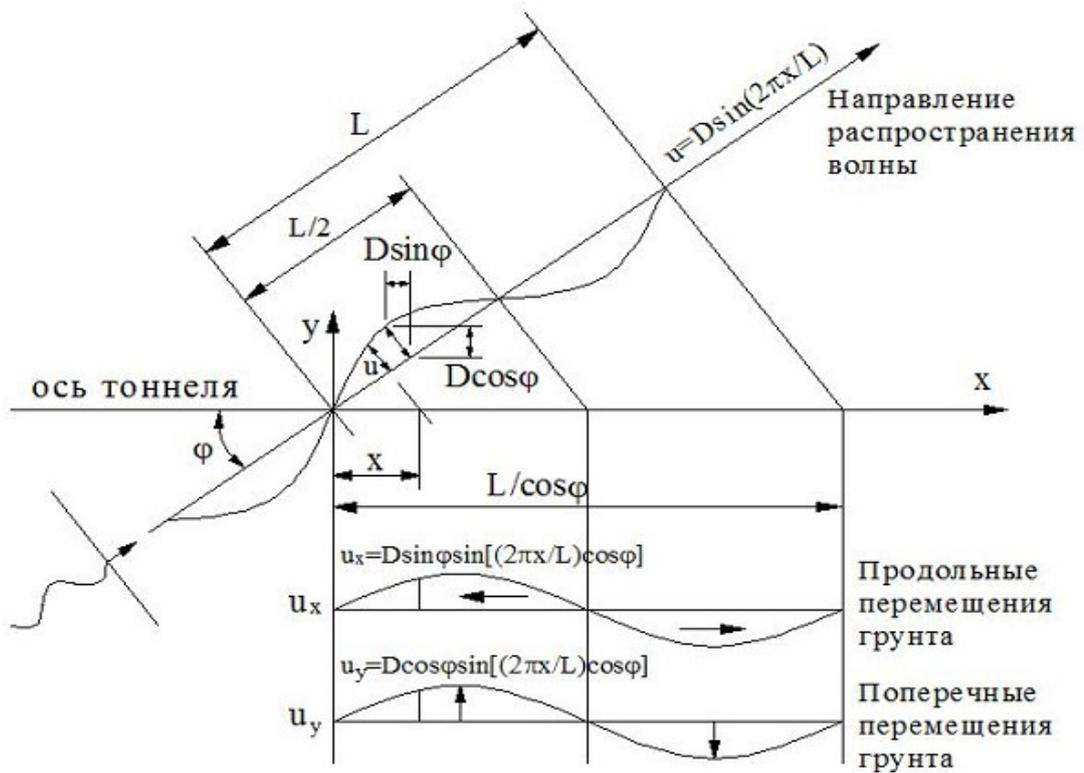


Рисунок 2.14 – Перемещения горных пород и элементов тоннеля под воздействием поперечной волны [19, 24, 49, 50]

Для синусоидальной волны с амплитудой перемещения  $D$  и длиной волны  $L$  получим внутренние усилия в тоннельной конструкции [19, 24, 49, 50]:

$$M = -\frac{EI}{\rho} = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D \cos^3 \varphi EI \sin\left(\frac{2\pi x}{L/\cos \varphi}\right); \quad (2.68)$$

$$V = -\frac{\partial M}{\partial x} = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D \cos^4 \varphi EI \cos\left(\frac{2\pi x}{L/\cos \varphi}\right); \quad (2.69)$$

$$Q = \left(\frac{2\pi}{L}\right) D \sin \varphi \cos \varphi EA \cos\left(\frac{2\pi x}{L/\cos \varphi}\right), \quad (2.70)$$

где  $M$  – изгибающий момент,  $Hm$ ;  $V$  – поперечная сила,  $H$ ;  $Q$  – продольная сила,  $H$ ;  $I$  – осевой момент инерции тоннельной обделки,  $m^4$ ;  $E$  – модуль упругости тоннельной обделки,  $H/m^2$ ;  $D$  – амплитуда поперечной волны,  $m$ ;  $L$  – длина поперечной волны,  $m$ ;  $A$  – площадь поперечного сечения обделки,  $m^2$ .

**Метод расчёта, учитывающий разницу деформаций на контакте тоннельной обделки и массива грунта.** В случае рассмотрения тоннелей, расположенных в областях с мягким грунтом, обделки тоннелей имеют гораздо большую жесткость, чем жесткость грунта, то между тоннелем и грунтовой средой возникает взаимодействие. Для рассмотрения взаимодействия между грунтом и обделками тоннелей можно использовать модель балки на упругом основании [24, 49, 50].

При сейсмической нагрузке поперечное сечение тоннеля будет испытывать осевые и поперечные деформации, и деформации сдвига. Формулы для определения максимальных таких деформаций приведены в работах [19, 24, 49, 50]:

максимальная осевая деформация, при которой угол падения волны составляет  $45^\circ$ :

$$\varepsilon_{\max}^a = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)}{2 + \left(\frac{E_t A_c}{K_a}\right) \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} A_a \leq \frac{fL}{4EA}; \quad (2.71)$$

максимальная поперечная деформация, при которой угол падения волны составляет  $0^\circ$ :

$$\varepsilon_{\max}^b = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 r}{1 + \left(\frac{E_t I_c}{K_t}\right) \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} A_b. \quad (2.72)$$

Тогда общая осевая деформация равна:

$$\varepsilon^{ab} = \varepsilon_{\max}^a + \varepsilon_{\max}^b. \quad (2.73)$$

Изгибающий момент и поперечная сила в тоннельной обделке определяются по формулам:

$$M_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D \cos^3 \varphi}{1 + \frac{EI}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 \cos^4 \varphi} EI \sin\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi}\right). \quad (2.74)$$

$$V_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D \cos^4 \varphi}{1 + \frac{EI}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 \cos^4 \varphi} EI \cos\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi}\right). \quad (2.75)$$

Формула (2.73) позволяет выразить осевые перемещения, соответствующие значениям продольных перемещений сечений обделки тоннеля, умноженным на коэффициент  $R_2$  (всегда меньше единицы):

$$R_2 = \frac{1}{1 + \frac{EA}{K_a} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \cos^2 \varphi}. \quad (2.76)$$

Используя формулу (2.70), получим осевые усилия в тоннельной обделке:

$$Q = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right) D \sin \varphi \cos \varphi}{1 + \frac{EI}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \cos^2 \varphi} EA \cos\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi}\right). \quad (2.77)$$

Расчётные усилия (изгибающий момент, поперечная и продольная силы) зависят от места их приложения вдоль тоннельной конструкции, от угла падения  $\varphi$ , от амплитуды и длины волны  $D$  и  $L$ . Максимальные значения усилий можно получить, приняв величины  $\sin\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi}\right)$  и  $\cos\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi}\right)$ , равными единице. Для определения угла падения необходимо приравнять частные производные от выражений (2.74) к (2.75) нулю. Видно, что максимальные значения достигаются при  $\varphi=0^0$ . Максимальное значение продольной силы зависит от свойств конструкции тоннеля и вмещающего массива горных пород. На практике, как правило, рекомендуется использовать угол падения волны, равный  $45^0$ . При этой величине угла падения  $\varphi$  достигается максимальное значение продольной силы

(взаимодействием между грунтом и тоннельной обделкой можно пренебречь).

Таким образом, максимальные усилия определяются формулами:

$$M_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D}{1 + \frac{EI}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} EI. \quad (2.78)$$

$$V_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D}{1 + \frac{EI}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} EI. \quad (2.79)$$

$$Q = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right) D}{1 + \frac{EI}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} EA. \quad (2.80)$$

Далее необходимо определить значения коэффициентов упругого основания  $K_h$  и  $K_a$  по формулам научных исследователей John C.M.St., Zahrah T.F. [50]:

$$K_h = K_a = \frac{16\pi G(1-\nu)}{3-4\nu} \frac{(2R)}{L}, \quad (2.81)$$

где  $G$  – модуль сдвига грунта,  $\kappa\text{H}/\text{м}^2$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона грунта;  $R$  – радиус тоннеля,  $\text{м}$ ;  $L$  – длина поперечной сейсмической волны,  $\text{м}$ .

Необходимо отметить, что максимальное значение продольной силы, приложенной к элементам обделки тоннеля, не должно быть больше максимального усилия трения  $Q_{\max}$  между тоннельной обделкой и вмещающими горными породами. Усилие  $Q_{\max}$  выражается формулой:

$$Q_{\max} = \frac{fL}{4}, \quad (2.82)$$

где  $f$  – максимальная сила трения, приходящаяся на единицу длины тоннеля.

**Метод расчёта, учитывающий эффекты взаимодействия тоннеля с грунтом, характеризующимся двумя коэффициентами постели. Рассмотрим**

тоннельную обделку в виде бесконечной балки с изгибной жесткостью  $EI$ , лежащей на основании. Свойства этого основания можно описать двумя упругими характеристиками  $k_1$  и  $k_2$ . Первый коэффициент постели  $k_1$  – коэффициент сжатия, который ничем не отличается от обычного коэффициента постели по теории Винклера. Второй коэффициент постели  $k_2$  – коэффициент сдвига, выражающий интенсивность вертикальной силы сдвига  $Q$  в виде произведения коэффициента  $k_2$  на производную функции осадки  $Q = k_2 \frac{\partial u}{\partial x}$ . Эти силы сдвига имеют место и в сыпучих, и мало связных грунтах вследствие сцепления и внутреннего трения между частицами грунта [4, 17, 19, 24, 25].

Соотношение между коэффициентами  $k_1$  и  $k_2$  определяется множителем  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{1}{1 + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \cos^2 \varphi + \frac{EI}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 \cos^4 \varphi}. \quad (2.83)$$

Изгибающий момент и поперечная сила в тоннельной конструкции определяются выражениями:

$$M = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D \cos^3 \varphi}{1 + \frac{EI}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 \cos^4 \varphi + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \cos^2 \varphi} EI \sin\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi}\right). \quad (2.84)$$

$$V = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D \cos^4 \varphi}{1 + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \cos^2 \varphi + \frac{EI}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 \cos^4 \varphi} EI \cos\left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi}\right). \quad (2.85)$$

Максимальные усилия, таким образом, определяются выражениями:

$$M = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D}{1 + \frac{EI}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} EI. \quad (2.86)$$

$$V = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D}{1 + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 + \frac{EI}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} EI. \quad (2.87)$$

Сравнивая полученные выражения, отметим, что значения перемещений тоннельной обделки и внутренних усилий, вычисленных с учетом двух характеристик грунтового основания меньше, чем те же значения, полученные при использовании обычного упругого основания Винклера.

## 2.4 Выводы по главе 2

1. Разработаны и широко представлены методы расчета воздействия сейсмических волн землетрясений в поперечных сечениях обделок тоннелей метрополитена в следующих случаях:

- поперечное сечение обделки тоннеля метрополитена представляет собой монолитное, однородное, упругое и неповрежденное кольцо без наличия стыков (сопряжений);

- обделка тоннеля метрополитена - сегментная обделка, есть стыки в обделке тоннеля.

2. Приводятся основные уравнения методов расчета обделок тоннелей метрополитена под воздействием сейсмических волн, вызванных землетрясениями и направленных вдоль оси тоннеля в следующих случаях:

- при совпадении деформаций тоннеля с деформациями «свободного поля»;

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

- при учете эффекта взаимодействия тоннеля с грунтом, характеризующимся двумя коэффициентами постели.

## ГЛАВА 3 ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ХАНОЕ

### 3.1 Геологические условия Ханоя

В настоящее время Вьетнам имеет столицу Ханой, это второй по величине город Вьетнама, в котором проживает 8 миллионов человек. Город Ханой расположен в водосборной зоне Красной реки, поэтому геологическое состояние Ханоя довольно сложно. При инженерно-геологическом исследовании территории, где расположен город Ханой, в качестве единицы для классификации горных пород используется понятие «слой». Слои породы характеризуются, представленные двумя параметрами  $R_0$  и  $E_0$ .  $R_0$  – сопротивление породы,  $E_0$  – модуль деформации породы. На основании значений  $R_0$  и  $E_0$  блоки делятся на разные классы. Геологические условия, в которых расположены тоннели системы метрополитена Ханоя показаны на рисунке 3.1. Механические, физические и толщинные параметры слоев грунта зоны заложения тоннелей метрополитена приведены в таблице 3.1; эти параметры получены путем бурения скважин ВН-13.

Таблица 3.1 – Характеристики грунтов, полученные в исследованиях [8, 9]

Номер слоя грунта	Мощность слоя $h_i$ , м	Плотность грунта $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения грунта $\varphi$ , градус	Связующая сила $C$ , МПа	Модуль деформации упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
1	4.6	1750	13 <sup>006'</sup>	0.673	9.25	0.41
2	1.1	1760	14 <sup>049'</sup>	0.597	7.68	0.38
3	11.8	1810	15 <sup>096'</sup>	0.458	15.30	0.35
4	12.5	1780	19 <sup>023'</sup>	0.103	35.02	0.33
5	11	1830	25 <sup>007'</sup>	0.02	53.90	0.32
6	7	1860	29 <sup>047'</sup>	0	65.00	0.30

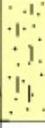
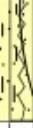
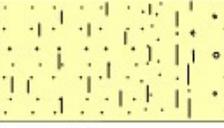
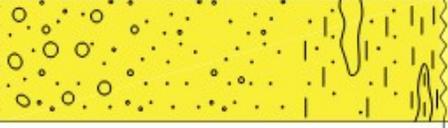
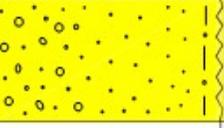
№ ИГЭ	Литологический разрез	Наименование грунтов		
		Глубина подошвы слоя, м	Мощность, м	
1		4,6	4,6	Заполнение: Пычя с гравием, кирпичной крошкой, сломанным бетоном...
2		1,1	5,7	
3		11,8	17,5	Твердый, Коричневато-серый, Темновато-серый наносы (МЛ) редко с органическим веществом
4		12,5	30	
5		11	41	Средний плотный, Коричневато-серый, Темновато-серый наносный песок (СМ) перемежку наносы
6		7	48	Плотный, Коричневато-серый, синевато-серый наносный песок (СМ)

Рисунок 3.1 – Геологический разрез от точки (20+095.5) км до точки (20+515.2) км [35]

В настоящее время проект строительства метрополитена Ханоя уже частично реализован. Системы надземные на линии метро № 1 уже построены. Согласно плану, подземные линии начнет строительство в 2023 году.

### 3.2 Сейсмические условия во Вьетнаме и Ханое

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) [8, 9, 24, 32, 41, 42, 74]. 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 особенности строения земной коры в области Ханоя: на глубине до 50 м располагаются мягкие глинистые слои, благодаря которым амплитуда сейсмических возмущений существенно усиливались при движении к земной поверхности.

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 [19, 22, 29]. По результатам исследовательских работ сделаны схемы и расчёты, учитывающие локации эпицентров, масштабы распространения волн и силу землетрясений и позволяющие оценить уровень опасности для столицы и всего

Вьетнама (рисунок 3.2).

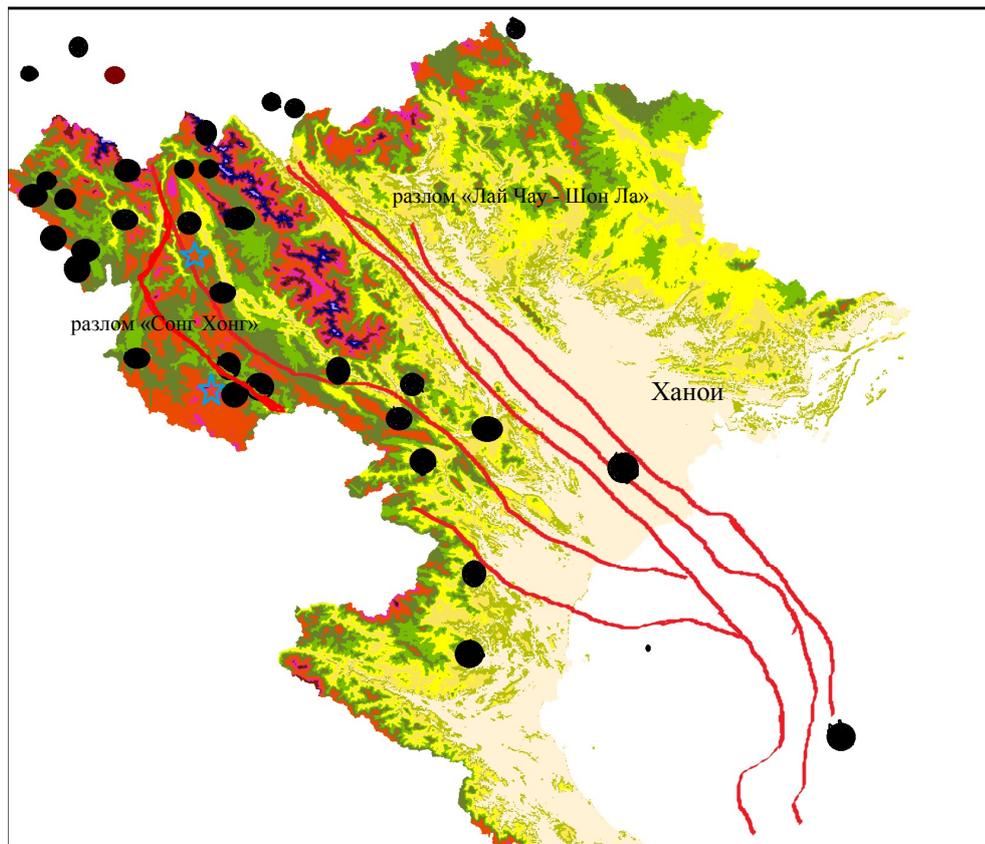


Рисунок 3.2 – Схема источников сильных землетрясений в городе Ханое и соседних регионах Вьетнама [41]

Благодаря расчётам, удалось показать такой уровень сейсмической активности, при котором ущерб для городских сооружений незначителен и несёт минимальную опасность. Он составил 6.5 баллов по шкале Рихтера. Для подземных конструкций глубина залегания составила  $H=20\text{м}$ , а интенсивность землетрясений – от 5 до 8 баллов по шкале MSK-64. Некоторые параметры источников, генерирующих землетрясения, приведены в таблице 3.2 [8, 9, 29].

Таблица 3.2 – Параметры источников землетрясений [8, 9, 10, 80, 93]

<b>Номер</b>	<b>Область</b>	<b><math>M_{\text{макс}}</math>, балл</b>	<b>H, м</b>
1	Ирабад	7.6	30
2	Си Саваг	6.2	30
3	Лян Кан	7.8	30
4	Вильянг Шань	6.1	25
5	Мыонг Шат	7.2	25
6	Сонг Ха-Рао Нау	6.1	17
7	Сонг Хонг – Сонг Чай	6.5	20
8	Сонг Ма – Сан Ла	7.3	25
9	Те Мыонг	7.3	15
10	Сонг Да - Фонг Тхо - Мыонг Ла	5.2	15
11	Сонг Ло	5.5	15
12	Као Банг – Тянь Хйена	5.8	15
13	Нань Нин	5.8	15
14	Вэн Бин Куанг Нин	5.8	15
15	Донг Триэу	5.8	25
16	Кин Туэн Хао Цзян	6.5	30
17	Вэн Бин Трун Квак	5.9	15
18	Хайнань	5.9	25
19	Кин Туэн	5.6	15
20	Бато - Кунг Сан	5.6	15
21	Мин Хай	5.6	12
22	Тра Бонг	5.6	12
23	Ванг Чао	5.6	30

Приведем некоторые важные уравнения затухающих колебаний, зависящих от расстояния до эпицентра землетрясений [80, 93].

Уравнение Корнелла:

$$a \text{ (см/с}^2\text{)} = 0,863 e^{0,86M} (R + 25)^{-1,8} g . \quad (3.1)$$

Уравнение Донована:

$$a \text{ (см/с}^2\text{)} = 1080 e^{0,5M} (R+25)^{-1,32} . \quad (3.2)$$

Уравнение Ештевы:

$$a \text{ (см/с}^2\text{)} = 5600 e^{0,8M} (R+40)^{-2,0} . \quad (3.3)$$

Уравнение Бооре, Джойнера и Фумала:

$$\ln a \text{ (g)} = -0,313 + 0,527 * (M_W - 6) - 0,778 * \ln R - 0,371 * \ln(363/1396) . \quad (3.4)$$

Формула Кэмпбелла:

$$\ln(A_H)(g) = -3,512 + 0,904M - 1,328 \ln \sqrt{R^2 + [0,149 \exp(0,647M)]^2} + [0,404 - 0,17 \ln(R)] . \quad (3.5)$$

### 3.3 Краткий обзор воздействия сейсмических волн землетрясений на метрополитен Ханоя

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. На рисунке 3.3 приведены корреляционные зависимости пиковых значений ускорений движения грунта при магнитудах  $M = 6.5$  с учетом уравнений (3.1 – 3.5).

Тоннели метрополитена Ханоя расположены неглубоко от поверхности земли и могут работать при воздействии сейсмических волн землетрясений. Тоннели могут быть повреждены в следующих случаях: разрушение тоннеля при обрушении откосов, появление продольных, поперечных и наклонных трещин, наличие трещин в основании тоннеля, трещины в зонах ниш и соединений, деформации стен и т.д. Таким образом, необходим обстоятельный анализ воздействия сейсмических волн землетрясений на метрополитен Ханоя, в том числе и при выборе оптимальных параметров и типов крепи метрополитена Ханоя. В таблице 3.4 приведены необходимые характеристики сейсмических волн

в слоях грунта в зоне заложения тоннеля. Необходимые значения скорости сейсмической волны получены на основе формул (3.6), (3.7).

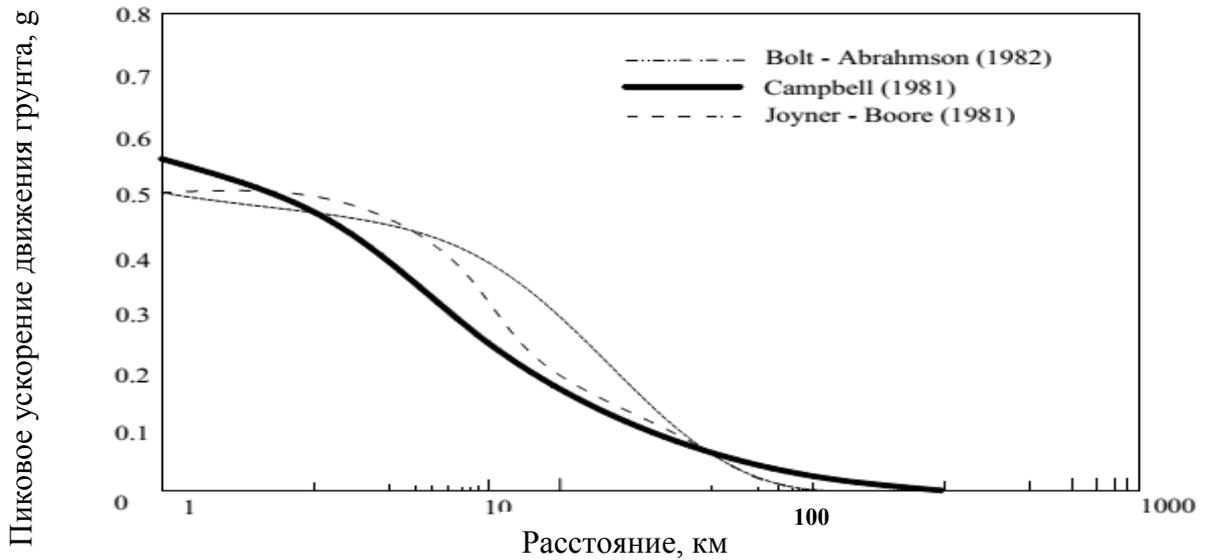


Рисунок 3.3 – Сравнение пика горизонтального ускорения движения грунта от расстояния до эпицентра землетрясений с магнитудой  $M=6.5$  [8, 9, 39, 50]

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 [8, 9, 10]:

$$C_s(d) = \frac{d}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{C_{Si}}}, \quad (3.6)$$

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 расчёта средних значений модуля упругости грунта имеет вид:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (3.7)$$

где  $E_i$  – модуль упругости  $i$ -го слоя, МПа;  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя, м.

Применение формул (3.6) и (3.7), с учетом данных таблицы 3.4, приводит к результатам, представленным в таблице 3.5.

В таблице 3.3 приведены данные о некоторых землетрясениях мира.

Таблица 3.3 – Затухание соотношения для пикового ускорения грунта [50, 59, 74]

Источник данных	Магнитуда, диапазон данных, балл	Расстояние, диапазон данных, км	Почвенный фактор	Уравнение	Рекомендации
Документация по землетрясениям из Западных штатов, США	5 до 7.6	60 до 160	горная порода	Графический	Schnabel and Seed (1973)
Документация по землетрясениям из Центральных штатов, США	$\leq 6.0$	50 до 120	грунт	$\log(A) = -0.36 + 0.56 m_b - 0.008 \log(R)$ $R \leq 15$ км; $\log(A) = 0.84 + 0.52 m_b - 1.02 \log(R)$ $R \geq 15$ км, где $A$ – ускорение грунта, $\text{см}/\text{с}^2$ ; $m_b$ – магнитуда; $R$ – расстояние до эпицентра, км	Nuttli and Herrmann (1978)
Документация по землетрясениям из Центральных штатов, США	4.4 до 7.7	10 до 250	горная порода, грунт	$\ln(A) = 3.40 + 0.89M - 1.17 \ln R - 0.20 Y_s$ , где $A$ – ускорение грунта, $\text{см}/\text{с}^2$ ; $M$ – магнитуда землетрясения; $R$ – гипоцентрально расстояние, км; $Y_s = 0$ порода 1 грунт	McGuire (1978)

Продолжение таблицы 3.3

Документация по 27 землетрясениям мира	5.0 до 7.7	<50	грунт	$A = 0.0159 e^{0.868M} [R+0.0606 e^{0.700M}]^{-1.09}$ <p>где А – ускорение грунта, см/с<sup>2</sup>  М – балл по шкале Рихтера  R – расстояние до причинного несправности, км</p>	Campbell (1981)
Документация по 23 землетрясениям из Северной Америки, США	5.0 до 7.7	40 до 300	грунт	$\log A = - 1.02 + 0.249M - \log r - 0.00255r,$ <p>где М – магнитуда;  R – расстояние до места повреждения, км  <math>r=(R^2+7.3^2)^{1/2}</math></p>	Joyner and Boore (1981 )

Таблица 3.4 – Характеристики слоев почвы в центральной части Ханоя и скорости волн землетрясения в слоях [8, 9, 24]

Номер слоя грунта	1	2	3	4	5	6
Модуль деформации упругости слоя грунта $E$ , МПа	9.25	7.68	15.3	35.02	53.9	65
Коэффициент Пуассона слоя грунта, $\nu$	0.41	0.38	0.35	0.33	0.32	0.3
Мощность слоя грунта $h_i$ , м	4.6	1.1	11.8	12.5	11	7
Плотность грунта $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1750	1760	1810	1780	1830	1860
Скорость волны сдвига в грунте $C_{Si}$ в $i$ -м слое, м/с	43.29	39.76	55.95	86	105.63	115.93
Скорость продольных волн в $i$ -м слое $C_{Pi}$ , м/с	110.85	90.38	116.48	170.73	205.30	216.89

Таблица 3.5 – Результаты расчета

Параметры грунта	Значение	Единица
Средний модуль упругости слоев грунта $E$	35.75	МПа
Средний коэффициент Пуассона слоев грунта $\nu$	0.34	–
Пиковая скорость поверхности грунта $V_S$	0.1184	м/с
Скорость распространения волн сдвига в грунте $C_S(d)$ ,	73.32	м/с
Эффективная скорость распространения волн сдвига в грунте $C_{Se}$	51.32	м/с
Скорость распространения продольных волн в грунте $C_P(d)$	152.84	м/с

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). Сейсмические волны могут воздействовать на Ханой с сейсмической интенсивностью магнитудой до 6,5 баллов по шкале Рихтера (по российской MSK-64 шкале до 8 баллов). Значение максимального ускорения движения грунта рекомендуется принимать равным  $a_g=0.2g$  с эпицентром источника землетрясений на расстоянии 20÷50 км [9, 10].

### 3.4 Выводы по главе 3

1. Приведены геологические условия Ханоя и необходимые характеристики сейсмических волн землетрясений во Вьетнаме и Ханое.
2. Произведен расчет характеристик сейсмических волн землетрясений; предложены уравнения для определения основных характеристик землетрясений и сейсмических волн при распространении их в грунте или в породной среде.
3. Установлено максимальное значение магнитуды сейсмического воздействия для Ханоя.
4. Построены методы расчета для определения пикового ускорения грунта Ханоя.
5. Получены формулы расчета средних значений основных характеристик грунта в центре Ханоя.

## ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ (ОБДЕЛОК) ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА ХАНОЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### 4.1 Основные характеристики метрополитена Ханоя

В настоящее время система тоннелей метрополитена Ханоя полностью спроектирована, а строительство находится на стадии завершения. Тоннели метро являются продолжением наземного общественного железнодорожного (трамвайного) транспорта. При этом часть метрополитена также имеет наземные пути. Таким образом, на сегодняшний день наземная часть метрополитена состоит из 8 станций протяжённостью 8.5 км, начиная со станции «Нхонь» и заканчивая станцией «Ким Ма» (рисунок 1.19). Подземная часть имеет протяжённость 4.0 км и включает всего 4 станции, конечными из которых являются «Ким Ма» и «Ханой» (рисунок 1.20). Строительство метрополитена города Ханоя и всей связанной с ним городской транспортной инфраструктуры планируется закончить в 2030 году [9, 10, 79].

Тоннели Ханойского метрополитена имеют сечение круглой формы и диаметр  $2R = 6.3$  м, для обделки использованы железобетонные тубинги. Глубина тоннеля  $H$  колеблется от 10 до 20 м.

Для строительства тоннелей используются закрытые способы, а именно щитовой метод проходки с использованием активного пригруза забоя, при этом специальные механизированные проходческие щиты имеют герметичную призабойную зону. В качестве активного пригруза используется грунт, перемешиваемый в призабойной зоне, специально нагнетаемая бентонитовая суспензия или сжатый воздух.

Сборная обделка тоннеля Ханойского метрополитена состоит из непрерывных колец. Эти кольца состоят из других сборных компонентов. Эти сборные компоненты изготавливаются в основном из железобетона, некоторые

специальные компоненты которых изготавливаются из стали и композитных материалов.

#### **4.2 Выбор тип крепи (обделок) для тоннелей метрополитена Ханоя**

**Тип крепи (обделок) для метрополитена.** Процесс проходки тоннеля заключается в выполнении следующих работ:

- первый процесс: проведение создания пространства в грунтовой массе согласно конструкции, транспортировка выкопанного грунта на поверхность;
- второй процесс: установка временных конструкций и несъемных конструкций для тоннеля (обделок тоннеля).

Тоннели делятся на разные типы в зависимости от предполагаемого использования тоннелей. Тоннели в системах городской инфраструктуры, тоннели в шахтах, транспортные тоннели и др.

Временная крепь для тоннелей - это антиструктурная конструкция для тоннелей при строительстве тоннелей. Неподвижная конструкция тоннеля (обделки тоннеля) является постоянной конструкцией, служащей для постоянного закрепления выработки. Влияние временных конструкций на тоннели: поддержание устойчивости тоннелей во время их строительства. Временная крепь может стать частью обделок тоннеля. Форма обделки тоннелей может варьироваться как в зависимости от предполагаемого использования тоннеля, так и в зависимости от свойств горной массы, вмещающей тоннель. Форма обделки тоннелей может быть в виде раструба, обделки прямоугольной формы, круговые обделки и т.д. (рисунок 4.1).

В настоящее время, в зависимости от условий эксплуатации и времени работы крепь для тоннелей метрополитена может быть изготовлена из дерева, стали и бетона. В тоннелях метрополитена в настоящее время существует два основных типа обделки – бесшовная обделка и сборные обделки. Далее приводятся некоторые типы крепи для тоннелей и их основные свойства.

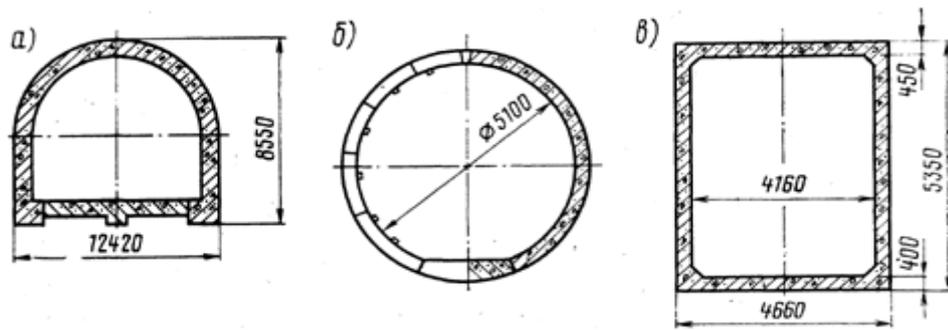


Рисунок 4.1 – Типы обделок тоннелей [20, 21]

а – подковообразная; б – круговая; в – прямоугольная

### Деревянные крепи

Достоинства – небольшая масса, простота изготовления и использования, дешевая. Недостатки деревянной крепи: скоропортящаяся, недолговечная, малое время работы (срок службы 2–3 года, иногда до 5 лет), легкость сгорания и низкая несущая способность. Деревянные крепи часто используются в угольных шахтах.

### Металлическая крепь (рисунок 4.2)

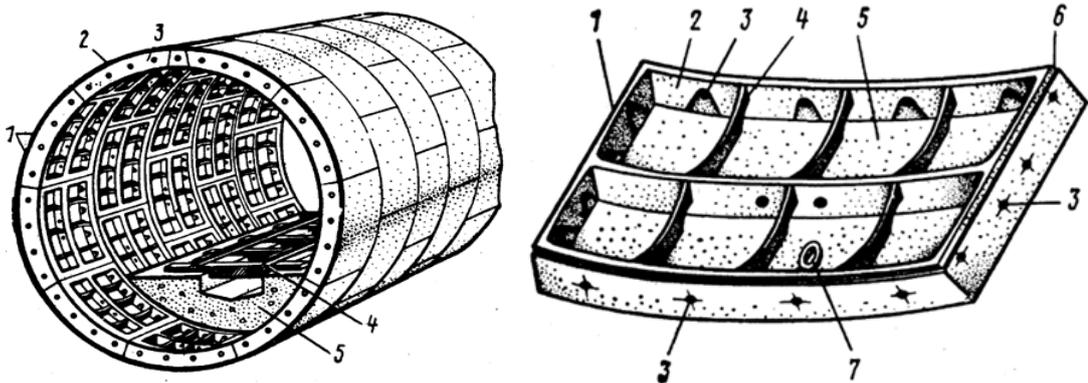


Рисунок 4.2 – Чугунный тубинг [20]

1 – радиальный (продольный) борт; 2 – кольцевой (поперечный) борт; 3 – болтовое отверстие; 4 – ребро жесткости; 5 – спинка тубинга; 6 – фальцы; 7 – отверстие для нагнетания уплотняющих и гидроизолирующих растворов.

Преимущества металлической крепи: металлическая крепь имеет длительный срок службы, время работы может достигать 25 лет. Обладает большой несущей способностью и способностью выдерживать большие усилия, изгиб и сжатие. Металлическая крепь огнестойка и может работать сразу после ее монтажа. Простота строительства и изготовления. Может использоваться как временная конструкция крепи для тоннелей, так и как постоянная конструкция для тоннелей (обделки тоннеля).

Недостатки: высокая стоимость, легко подвергается коррозии, значительно тяжелее, чем деревянная крепь.

#### Бетонные и железобетонные крепи

Бетон – это искусственный материал, изготовленный из смеси гравия, щебня, цемента, песка, воды и добавок. Бетон обладает способностью выдерживать небольшую изгибающую силу, имеет малую прочность на растяжение. Преимущество бетона заключается в его способности противостоять высоким силам сжатия. Рабочее время бетона – это длительный срок службы; бетон является материалом, который является устойчивым к огню, водостоек и в минимальной степени подвержен выветриванию и коррозии. Бетонные крепи делятся на 2 типа: монолитная бетонная крепь и блочная бетонная крепь. Железобетонные крепи – это тип конструкции, представляющий собой комбинацию бетона и стали. У железобетона есть преимущества: высокая несущая способность, огнестойкость и коррозионная стойкость, водонепроницаемость, хорошая устойчивость к изгибу и сжатию, низкая стоимость. Монтаж железобетонной крепи начинается со строительства арматурного каркаса. Форма и детальная структура арматурных каркасов зависят от рабочих требований конструкций тоннеля. Армированные каркасы могут быть изготовлены из стальных прутков круглого сечения или другой формы.

Сборные железобетонные конструкции изготавливаются на заводах; после их готовности они транспортируются и устанавливаются на строительной площадке (рисунок 4.3). Сборные железобетонные конструкции делятся на два типа: монолитные или могут быть собраны из других компонентов, таких как

плиты, трубы, блоки. Последний тип структуры железобетонной конструкции обычно используется для тоннелей метрополитена.

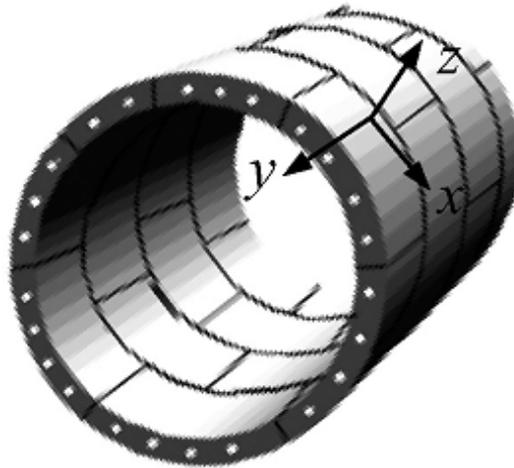


Рисунок 4.3 – Сборные железобетонные крепи [20, 21]

Крепё подземных сооружений представляет собой несущую конструкцию, которая должна соответствовать следующим техническим требованиям: обеспечить прочность, устойчивость, водостойкость, огнестойкость. При расчете и проектировании несущих конструкций подземных сооружений необходимо выполнить технические требования к подземным сооружениям, а также учесть свойства гидрогеологических условий сред, в которых располагаются подземные сооружения, и данные о свойствах подземного сооружения (глубина подземного сооружения, параметры крепи подземного сооружения).

**Крепи для тоннелей метрополитена Ханоя.** Крепи (обделки) подземных сооружений представляют собой жесткие строительные конструкции, созданные для удержания формы и размеров подземных сооружений. Крепи (обделки) подземных сооружений подвергаются воздействию геологических факторов, грунтовых вод, нагрузок, возникающих при строительстве подземных сооружений, и нагрузок, возникающих при эксплуатации. Поэтому крепи (обделки) подземных сооружений должны обладать достаточной прочностью, устойчивостью и водостойкостью. При выборе крепи (обделки) для подземного

сооружения необходимо исходить из геологических и гидрогеологических условий окружающих грунтовых сред, где расположены подземные сооружения, и свойств подземных сооружений, таких как глубина залегания подземных сооружений, размер подземных сооружений, эксплуатация подземных сооружений. Эксплуатация подземных сооружений, характеристики волн землетрясений могут влиять на подземные сооружения. В конструкциях для подземных сооружений часто используются бетонные конструкции из литого бетона или бетона в сочетании с арматурой. Типы железобетонных сборных обделок широко используются при строительстве подземных подземных сооружений.

В настоящее время имеется много типов обделок для тоннелей метрополитена, учитывающих время, методы и технологии ведения строительства тоннелей, свойства грунтов во время сейсмической активности. 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  $E_t = 36750$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu_t = 0.1515$ ; толщина обделки  $t = 0.35$  м.

Заводские блоки и тубинги, поставляемые во время строительства в тоннель, собираются в обделки, имеют соответствующий тоннелю диаметр и состоят из ряда колец. Элементы с гладкими боковыми поверхностями и сплошным сечением, используемые в конструкциях тоннеля, называются блоками. Элементы с ребристыми боковыми стенками – тубингами. Блоком называют элемент сплошного сечения с гладкими поверхностями, тубингом – элемент с ребристой внутренней поверхностью. Тубинги и блоки соединяются друг с другом в кольца, при этом грани, параллельные оси тоннеля, называются продольными, или радиальными, а грани, соединяющие отдельные кольца между

собой (перпендикулярные оси тоннеля), – поперечными, или кольцевыми (круговыми).

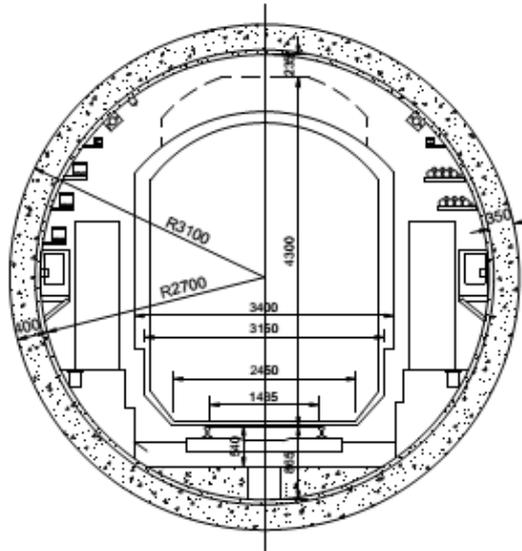


Рисунок 4.4 – Поперечное сечение метрополитена Ханоя [21, 35]

#### 4.3 Расчёт параметров крепи (обделок) тоннелей метрополитена Ханоя

Для определения параметров тоннельных обделок при воздействии сейсмических волн землетрясений, необходимо вычислить внутренние усилия, возникающие в обделке тоннеля, как различными аналитическими методами, так и методами численного моделирования, сравнивая полученные результаты.

По мнению проф. В.Л. Трушко и проф. А.Г. Протосени [30], 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 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.

**Расчет напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений. Учитывая**

круглую форму сечения тоннелей, диаметр обделки  $2R = 6.3$  м и её материал (железобетон) (рисунок 4.4) для расчётов были использованы методы Wang и Penzien [77, 78, 93, 94, 95], в работе были произведены расчеты деформаций и других параметров напряженного состояния обделок тоннелей в результате сейсмической активности модели «грунт – тоннельная обделка».

Другие основные характеристики обделок тоннелей [8, 9, 29]: глубина тоннеля  $H$  колеблется от 10 до 20 м; модуль упругости материала обделки  $E_l = 36750$  МПа; коэффициент Пуассона материала обделки  $\nu_l = 0.1515$ ; толщина обделки  $t = 0.35$  м.

Используя методику Wang и Penzien [6, 7, 16, 29, 65, 77, 78, 93], в работе произведен расчёт овализации поперечных сечений цилиндрической тоннельной обделки в рамках рассматриваемой модели «грунт – тоннельная обделка». С помощью методики Wang и Penzien было рассчитано максимальное обжатие тоннельной обделки  $T_{max}$ , максимальный изгибающий момент  $M_{max}$  и деформация диаметра  $\Delta(2R)/2R$  с учетом полного проскальзывания тоннельной обделки относительно вмещающего ее грунта, а также с учетом сил сцепления. Результаты численных расчетов изгибающих моментов и продольных сил в тоннельных обделках отражены на рисунках 4.5 и 4.6.

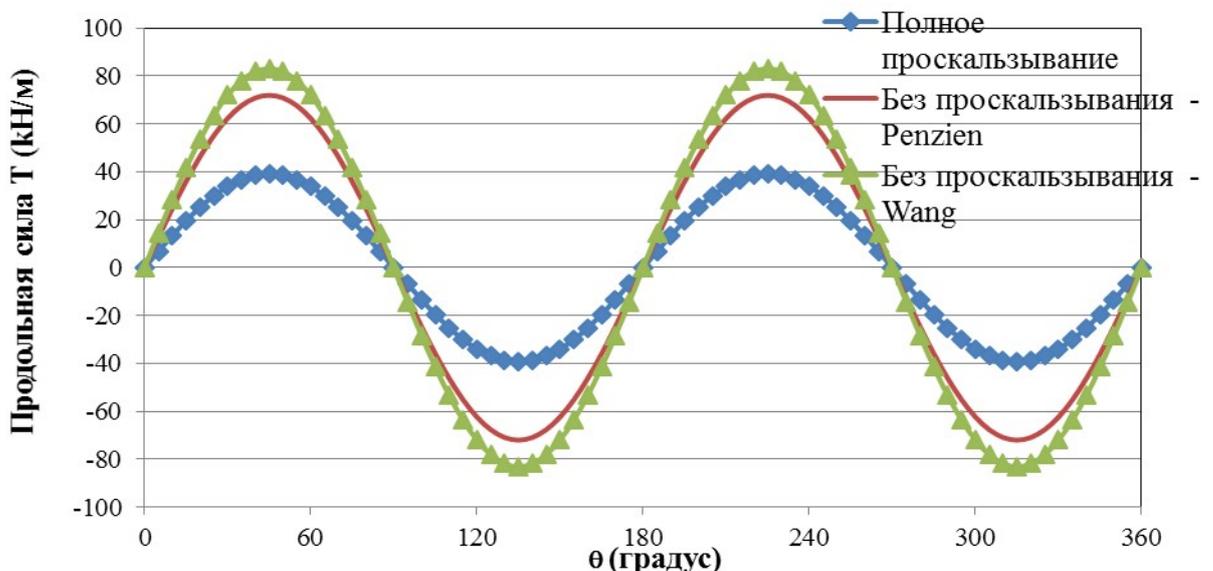


Рисунок 4.5 – Продольная сила  $T$  (кН/м)

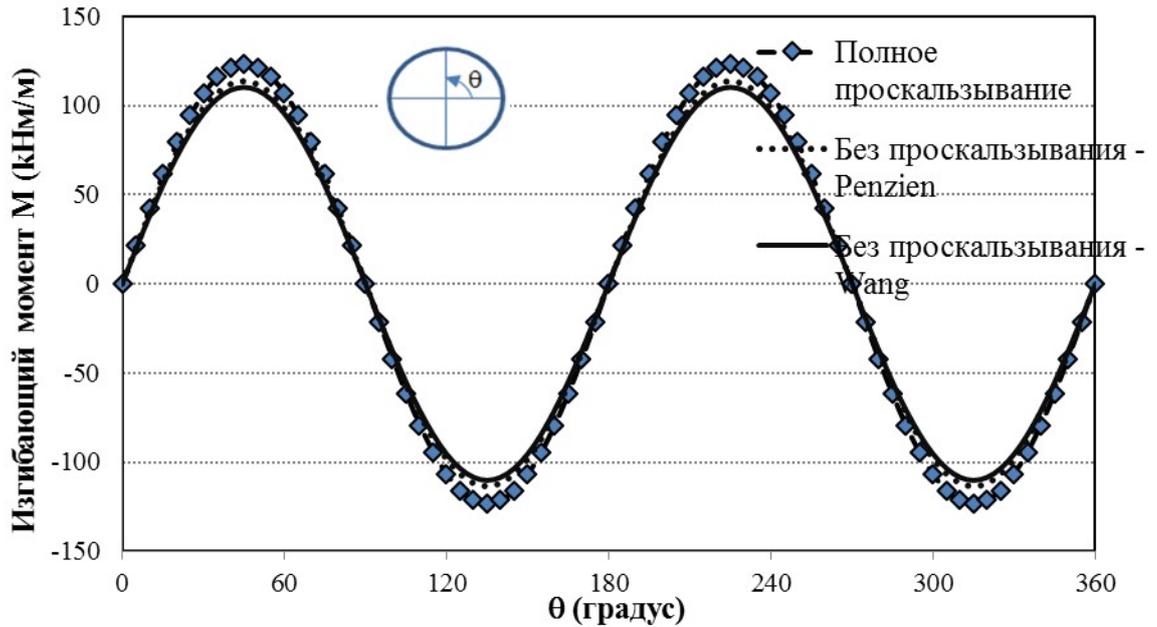


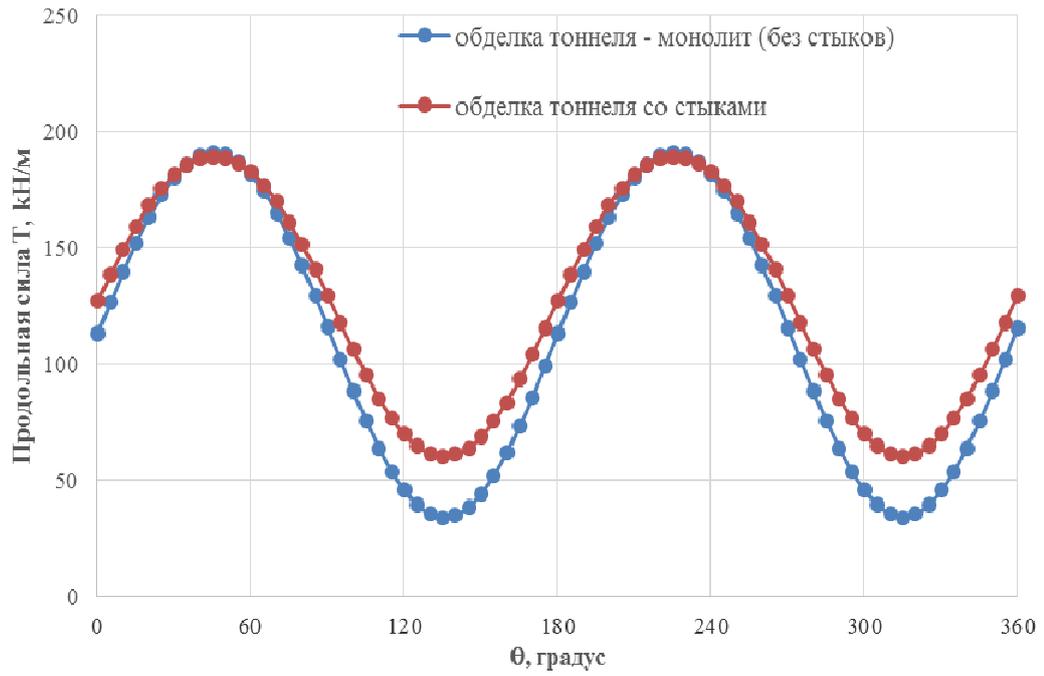
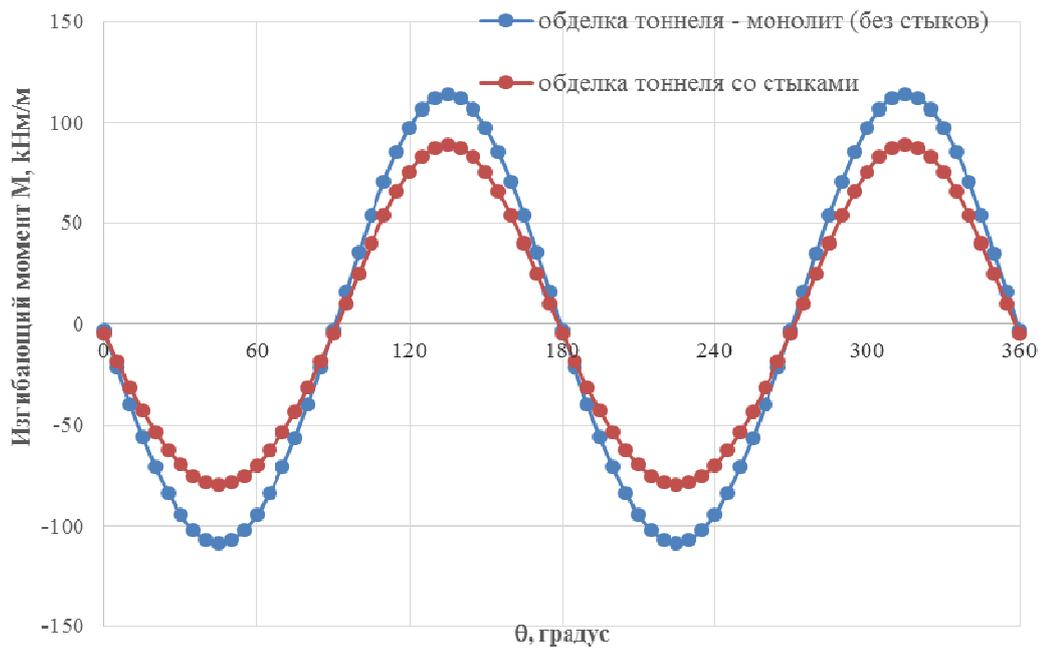
Рисунок 4.6 – Изгибающий момент  $M$  (кНм/м)

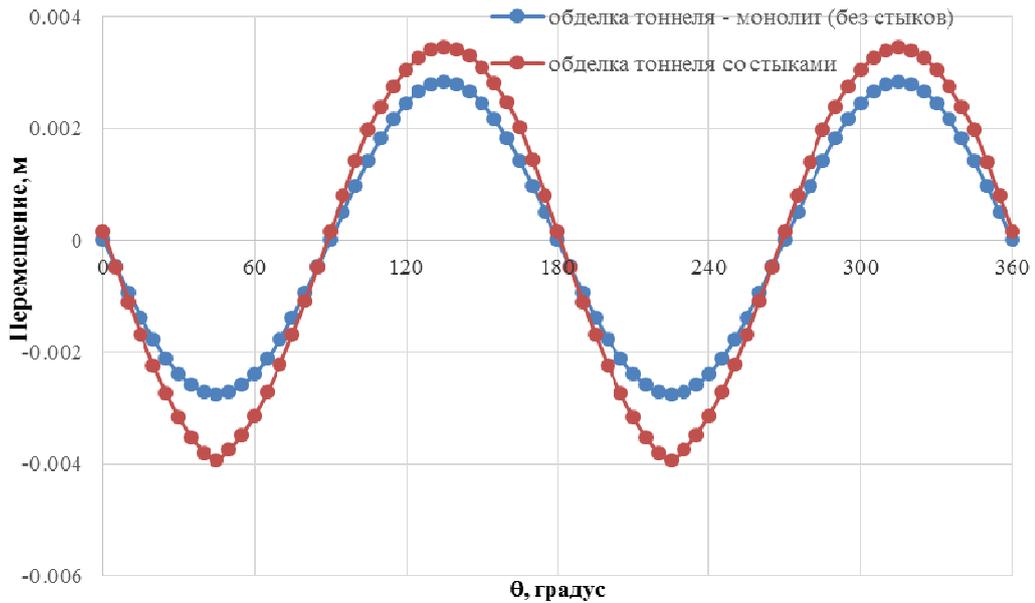
Максимальное нормальное напряжение при изгибе и при сжатии вдоль оси тоннеля рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} t}{2I_l} + \frac{T_{\max}}{A_l} = \frac{110.03 \cdot 0.175}{0.00357} + \frac{82.95}{0.35} = 5757.12 \text{ кН/м}^2 = 5.757 \text{ МПа} < [\sigma]_{кр} = 22 \text{ МПа}, \quad (4.1)$$

где  $t$  – толщина обделки,  $t = 0.35$  м;  $I_l = \frac{1}{12}(2R)^3 t$  – момент инерции тоннельной обделки (на единицу ширины),  $I_l = 0.00357 \text{ м}^4$ ;  $A_l$  – площадь поперечного сечения обделки (на единицу погонной длины обделки),  $A_l = 0.35 \text{ м}^2$ .

Численные результаты получены также с использованием программного комплекса MATLAB. 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 изгибающих моментов  $M$ , продольных сил  $T$  и перемещений  $u$  в тоннельных обделках приведены на рисунках 4.7 – 4.9.

Рисунок 4.7 – Продольная сила  $T$  (кН/м)Рисунок 4.8 – Изгибающий момент  $M$  (кНм/м)

Рисунок 4.9 – Перемещение  $u$ , м

Параметры обделки тоннеля и грунта взяты из работы [8, 9]:  $E$  – модуль упругости тоннельной обделки,  $E_l = 36750$  МПа;  $\nu_l$  – коэффициент Пуассона материала обделки,  $\nu_l = 0.15$ ;  $\rho$  – плотность обделки,  $\rho = 2500$  кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – радиус обделки тоннеля,  $R = 3.15$  м;  $A_s$  – площадь поперечного сечения обделки,  $A_s = 6.539$  м<sup>2</sup>;  $t$  – толщина обделки,  $t = 0.35$  м;  $E$  – средний модуль упругости слоев грунта,  $E = 35.77$  МПа;  $\nu$  – средний коэффициент Пуассона слоев грунта,  $\nu = 0.34$ ;  $V_S$  – пиковая скорость поверхности грунта,  $V_S = 0.1184$  м/с;  $C_{S(d)}$  – скорость распространения волн сдвига в грунте,  $C_{S(d)} = 73.32$  м/с;  $C_{Se}$  – эффективная скорость распространения волн в грунте,  $C_{Se} = 51.32$  м/с;  $\rho$  – плотность грунта,  $\rho = 1810$  кг/м<sup>3</sup>;  $n$  – число элементов в кольце обделки,  $n = 360$ ;  $B$  – линия кольца обделки,  $B = 1$  м;  $\kappa$  – число стыков в кольце обделки,  $\kappa = 6$ ;  $K_0$  – коэффициент поперечного давления,  $K_0 = 0.5$ ;  $H$  – глубина верхней части тоннеля,  $H = 20$  м.

Результаты численного расчёта для тоннельных обделок метрополитена Ханоя (вариант при наличии стыков и вариант нет стыков) под воздействием сейсмических волн землетрясений при изгибе:

Вариант без наличия стыков в обделке тоннелей:  $M_{max} = 106.64$  кНм/м;  $T_{max} = 190.33$  кН/м;

Максимальное перемещение конца обделки равно  $u_{max} = 2.8$  мм;

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

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} Y}{I_l} + \frac{T}{A_l} = \frac{106.64 * 0.175}{0.00357} + \frac{190.33}{0.35} = 5771.5259 \text{ кН/м}^2 = 5.771 \text{ МПа} < [\sigma]_{\text{кр}} = 22 \text{ МПа}, \quad (4.2)$$

Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей:  $M_{\max} = 88.89 \text{ кНм/м}$ ;  $T_{\max} = 189.12 \text{ кН/м}$ ;

Максимальное перемещение конца обделки равно  $u_{\max} = 3.9 \text{ мм}$ ;

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

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} Y}{I_l} + \frac{T}{A_l} = \frac{88.89 * 0.175}{0.00357} + \frac{189.12}{0.35} = 4898 \text{ кН/м}^2 = 4.898 \text{ МПа} < [\sigma]_{\text{кр}} = 22 \text{ МПа}, \quad (4.3)$$

где  $Y$  –  $\frac{1}{2}$  толщины обделки,  $Y = 0.175 \text{ м}$ ;  $I_l = \frac{1}{12} (2R)^3 t$  – момент инерции тоннельной обделки (на единицу длины обделки),  $I_l = 0.00357 \text{ м}^4$ ;  $A_l$  – площадь поперечного сечения обделки (на единицу длины обделки),  $A_l = 0.35 \text{ м}^2$ ;  $t$  – толщина обделки,  $t = 0.35 \text{ м}$ .

Следует отметить, что величина перемещений обделки тоннеля, а также понижающее значение изгибающего момента  $M_{\max}$  и понижающее значение максимального нормального напряжения  $\sigma_{\max}$  увеличиваются при наличии стыков в обделке тоннеля.

При анализе модели «грунт-обделка» в данной расчёте произведён расчёт основных характеристик напряжённого состояния тоннелей с использованием программы ABAQUS. Взаимодействие данной модели с сейсмическими волнами охарактеризовано в таблицах 3.4 и 3.5. При расчёте в программу введены следующие исходные значения [8, 9, 35, 39, 40]: модуль упругости грунта  $E = 35.75 \text{ МПа}$ ; коэффициент Пуассона грунта  $\nu = 0.34$ ; глубина тоннеля  $H = 20 \text{ м}$ , а также параметры обделки тоннеля: модуль упругости материала тоннельной

обделки  $E_l = 36750$  МПа; коэффициент Пуассона материала обделки  $\nu_l = 0.1515$ ; толщина обделки  $t = 0.35$  м.

Геометрическая модель тоннеля представлена на рисунке 4.11 с учётом размеров. Рисунок 4.12 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.

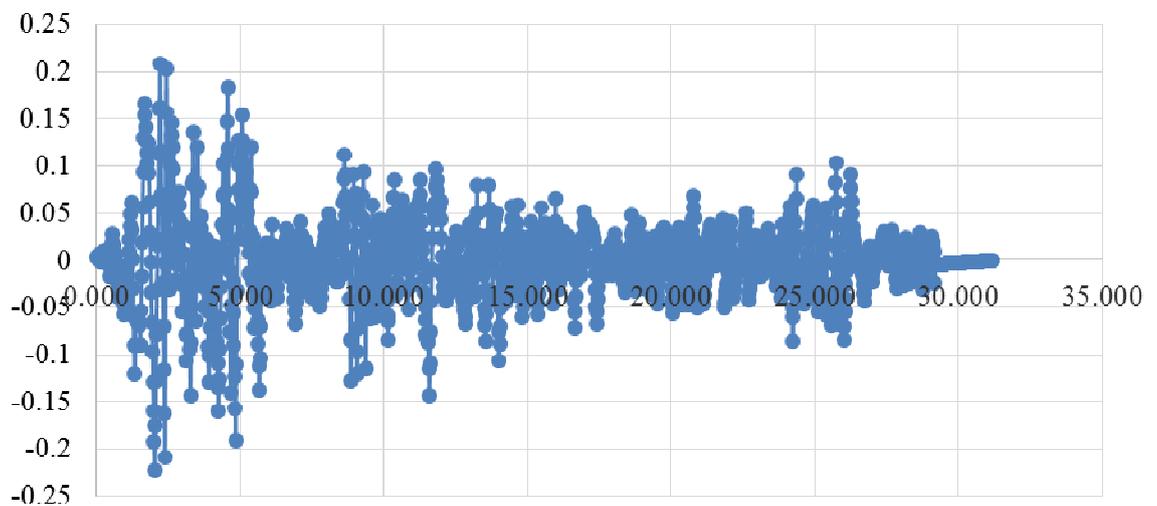


Рисунок 4.10 – Данные землетрясения EL Centro [9, 42]

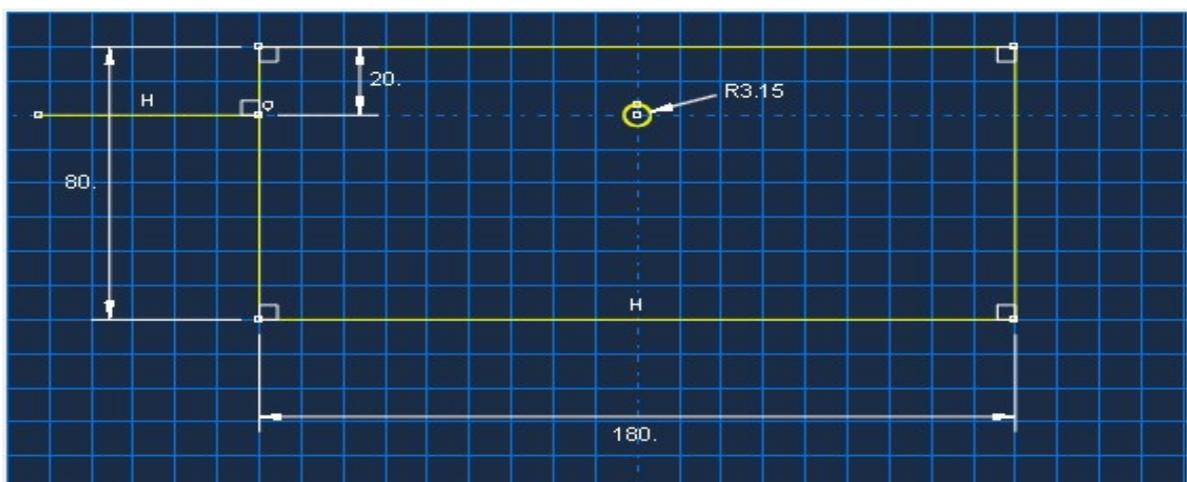


Рисунок 4.11 – Геометрическая модель тоннеля

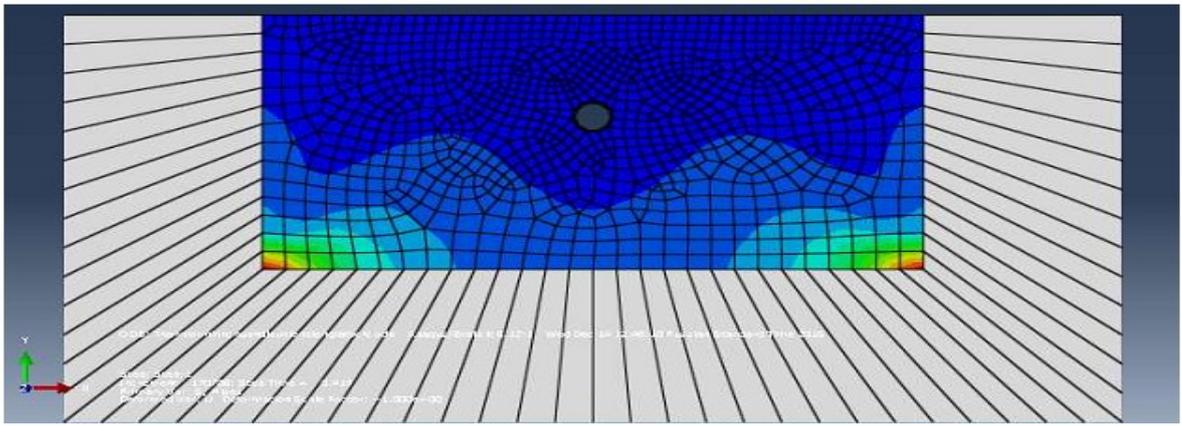


Рисунок 4.12 – Конечно-элементная модель тоннеля метрополитена Ханоя

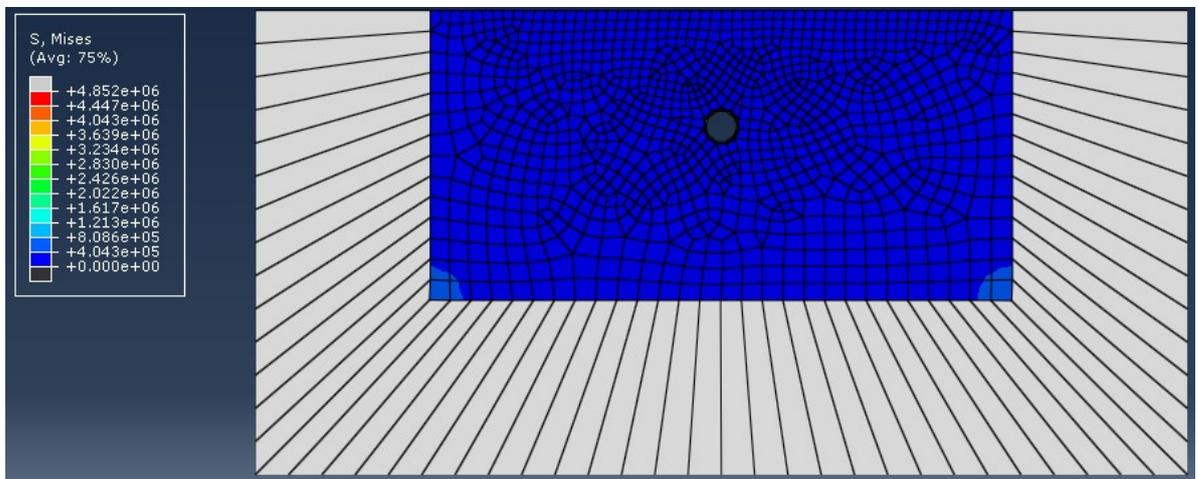


Рисунок 4.13 – Расчет модельного тоннеля по двумерному численному методу

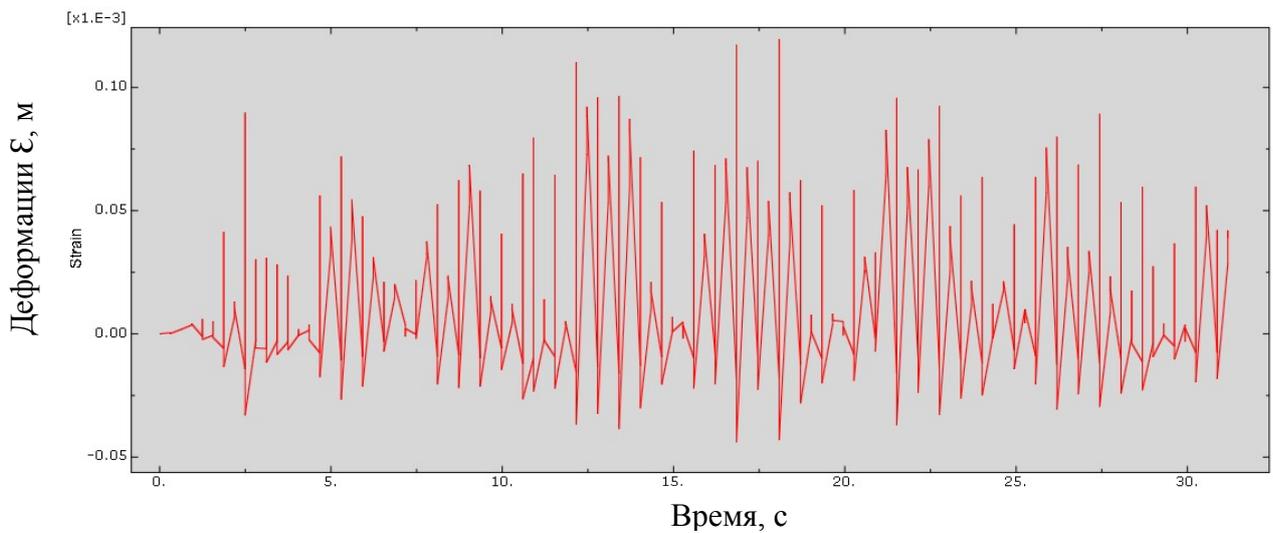
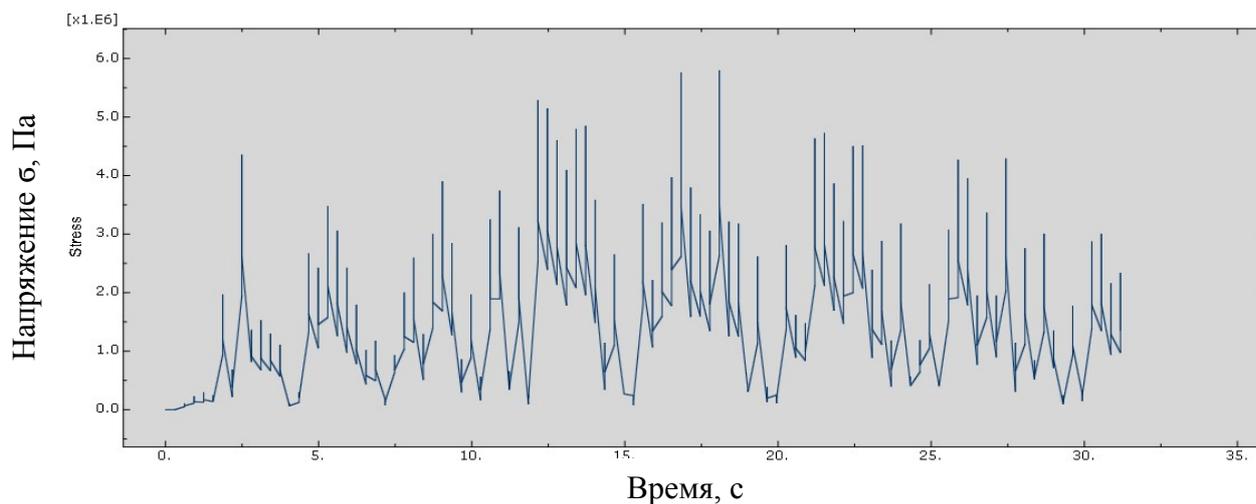


Рисунок 4.14 – Деформация обделки тоннеля

Рисунок 4.15 – График нормальных напряжений  $\sigma$ , Па

На рисунках 4.13 – 4.15 приведены результаты численных расчётов, выполненных с учетом параметров и характеристик тоннелей метрополитена Ханоя, методом конечных элементов по программе ABAQUS:

Максимальные деформации в обделке,  $\varepsilon$  –  $1.2 \cdot 10^{-4}$  м;

Максимальные нормальные напряжения в обделке,  $\sigma_{\max}$  – 5.782 МПа;

Таблице 4.1 – Максимальные значения внутренних усилий в тоннельной обделке метрополитена Ханоя.

Метод		Следующий случай	$T_{\max}$ кН	$M_{\max}$ кНм/м	$\sigma_{\max}$ МПа
Аналитический	Wang	Полное проскальзывание	39.12	123.24	6.148
		Без проскальзывания	82.95	110.03	5.626
	Penzien	Полное проскальзывание	39.12	123.24	5.924
		Без проскальзывания	71.96	113.34	5.757
Численный	HRM-без стыка	Без проскальзывания	190.33	106.64	5.771
	HRM-есть стыки	Без проскальзывания	189.12	88.89	4.898
	ABAQUS-без стыка	Без проскальзывания	-	-	5.782

*Предельное напряжение обделки тоннелей,  $[\sigma]_{кр} = 22 \text{ МПа}$*

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  $\sigma_{\max} = 5.757 \text{ МПа}$ . Решая задачу методом конечных элементов, было получено максимальное нормальное напряжение в обделке тоннеля  $\sigma_{\max} = 5.782 \text{ МПа}$ . 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  $\sigma_{кр} = 22 \text{ МПа}$* ). Другими словами, обделка тоннелей метрополитена Ханоя находится в надёжном состоянии и устойчива к землетрясениям.

Метод HRM, примененный в диссертационной 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 на основе вычислительной программы ABAQUS, дает возможность получить необходимые значения внутренних усилий в поперечных сечениях (круглой формы) тоннельных обделок. При наличии стыков в обделке тоннеля понижающие значения изгибающего момента  $M_{\max}$  и значения максимального нормального напряжения  $\sigma_{\max}$  уменьшаются в обделке тоннеля, при этом значения перемещений обделки тоннеля незначительно возрастают.

**Расчет напряженного и деформированного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений, направленных вдоль оси тоннелей.** Необходимый учёт взаимодействия обделки тоннеля с грунтом в работе производится в рамках применения упругого основания Винклера. Тогда формулы для значений усилий имеют вид [15, 17, 19, 23, 24, 30, 49, 50]:

$$M_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D}{1 + \frac{E_l I}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} E_l I = 124840.05 \text{ кНм.} \quad (4.4)$$

$$V_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D}{1 + \frac{E_l I}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} E_l I = 4780.46 \text{ кН.} \quad (4.5)$$

$$Q_m = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right) D}{2 + \frac{E_l A}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} E_l A_s = 19924.40 \text{ кН.} \quad (4.6)$$

В формулах (4.4) – (4.6) предварительно необходимо определить коэффициенты упругого основания,  $K_h$  и  $K_a$ . На основе результатов исследований учёных John C.M.St., Zahrah T.F., [19, 23, 24, 30, 49, 50] имеем:

$$K_h = K_a = \frac{16\pi G(1-\nu)}{3-4\nu} \frac{(2R)}{L} = 7685.72;$$

Максимальное нормальное напряжение при изгибе определяется выражением:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} R = 13542.71 \text{ кН/м}^2 = 13.542 \text{ МПа} < [\sigma]_{кр} = 22 \text{ МПа.} \quad (4.7)$$

Максимальное нормальное напряжение при сжатии вдоль оси тоннеля:

$$\sigma_{\max} = \frac{Q_{\max}}{A_s} = 3046.99 \text{ кН/м}^2 = 3.047 \text{ МПа} < [\sigma]_{кр} = 22 \text{ МПа.} \quad (4.8)$$

При учёте взаимодействия конструкции с грунтом с использованием упругого основания с двумя коэффициентами постели:

$$M = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 D}{1 + \frac{E_l I}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4 + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} E_l I = 103140.82 \text{ кНм}. \quad (4.9)$$

$$V = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 D}{1 + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 + \frac{E_l I}{k_1} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} E_l I = 3949.54 \text{ кН}, \quad (4.10)$$

где  $k_2 = 0.5\sqrt{k_1 E_l I} = 1431925.39. \quad (4.11)$

Максимальное нормальное напряжение при изгибе равно:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} R = 11188.771 \text{ кН/м}^2 = 11.19 \text{ МПа} < [\sigma]_{кр} = 22 \text{ МПа}. \quad (4.12)$$

где  $M$  – изгибающий момент, Нм;  $V$  – поперечная сила, кН;  $Q$  – продольная сила, кН;  $I$  – осевой момент инерции тоннельной обделки, м<sup>4</sup>;  $E_l$  – модуль упругости тоннельной обделки, кН/м<sup>2</sup>;  $G$  – модуль сдвига грунта, кН/м<sup>2</sup>;  $\nu$  – коэффициент Пуассона грунта;  $D$  – амплитуда поперечной волны, м;  $R$  – радиус тоннеля, м;  $L$  – длина поперечной волны, м;  $A_s$  – площадь поперечного сечения обделки, м<sup>2</sup>.

Таким образом, получены результаты для двух вариантов расчета: взаимодействие рассматриваемого подземного сооружения с грунтом с использованием упругого основания Винклера и взаимодействие подземного сооружения с грунтом в рамках модели упругого основания Винклера с двумя коэффициентами постели. Полученные значения позволяют сделать следующие выводы [15, 17, 19].

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.

#### 4.4 Выводы по главе 4

1. Описаны типы структур, которые используются при строительстве тоннеля.
2. Приведены характеристики тоннелей системы метрополитена Ханоя.
3. Выбор типа обделок тоннеля метрополитена Ханоя.
4. Использованы методы расчета внутренних усилий в обделке тоннеля под воздействием волн землетрясений, с учетом геологических условий расположения тоннелей метрополитена Ханоя.
5. Произведено численное моделирование напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием землетрясения с использованием программного комплекса ABAQUS.
6. Произведено широкое сравнение результатов, полученных с помощью различных методов расчета.

## 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 численными методами конечных элементов. Произведено широкое сравнение полученных результатов на основе численно-аналитического метода и численными методами с натуральными замерами землетрясения (Ханой, 1983).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Амосов А.А. Основы теории сейсмостойкости сооружений / А.А. Амосов, С.Б. Сеницын // Изд-во АСВ, 2001. – 96 с.
2. Бирбраер А.Н. Расчёт конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – СПб.: Наука, 1998. – 255 с.
3. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: «Недра», 1994. – 382 с.
4. Горбунов - Посадов М.И. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М.И. Горбунов-Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов и др. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
5. Городецкий А.С. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона/ А.С. Городецкий, Л.Г. Батрак, Д.А. Городецкий, М.В. Лазнюк, С.В. Юсипенко. – К.: Издательство «Факт», 2004. – С. 37-39.
6. Господариков А.П., Нгуен Чи Тхань. Исследования методов расчётов крепи тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Инженерия и технология – Вьетнам, Ханой, 2016. – № 5. – С. 341-352.
7. Господариков А.П. Исследования основных параметров сейсмических волн землетрясений в области Вьетнама и Ханоя / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Журнал горнодобывающей промышленности и промышленности Вьетнама. – 2016. – № 4. – С. 61-65.
8. Господариков А.П. О некоторых подходах определения напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя с учетом влияния сейсмических волн землетрясений / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2017. – Т. 6. – С. 244-252.
9. Господариков А.П. Об учете воздействия сейсмических волн землетрясений на напряженное состояние обделок тоннелей / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Сборник научных трудов VIII Международной научно-

практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ». – СПб, 2017. – С. 460-467.

10. Господариков А.П. Учет геологических условий при воздействии сейсмических волн в зоне расположения тоннелей метрополитена Ханоя / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Сборник научных трудов IV Международной научно-методической конференции «Современные образовательные технологии в преподавании естественно-научных и гуманитарных дисциплин». – СПб, 2017. – С. 1085-1093.

11. Господариков А.П. Изучение и испытание "SPT" для расчёта разжижения грунта под воздействием землетрясений в центре Ханоя / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Эксперименты по общественным архитектурным сооружениям». – Ханой, 2017. – С. 38-46.

12. Господариков А.П. Исследование разжижения грунтов под воздействием землетрясений в зоне расположения метрополитена Ханоя / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений. Санкт-Петербургский горный университет. – СПб, 2017. – С.12-13.

13. Господариков А.П. Об одном методе расчета напряженного состояния обделок метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений. Санкт-Петербургский горный университет. – СПб, 2017. – С. 31-32.

14. Господариков А.П. Исследование напряженного состояния сопряжений в поперечных сечениях обделок тоннелей метрополитена Ханоя при воздействии сейсмических волн землетрясений / А.П. Господариков, Нгуен Чи Тхань // Маркшейдерский Вестник. – 2018. – № 2(123). – С. 44-49.

15. Зайнагабдинов Д.А., Май Дык Минь. Модели для расчета тоннелей, пересекающих активные разломы / Д.А. Зайнагабдинов., Май Дык Минь // Институт Государственного управления, права и инновационных технологий (ИГУПИТ). – Интернет журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2013. – № 3. – С. 1-10.

16. Ковальский Е.Р., Мозер С.П., Михайленко О.В., Сидоренко С.А. Некоторые методические подходы к оценке устойчивости подземных сооружений при динамических нагрузках от землетрясений / Е.Р. Ковальский, С.П. Мозер, О.В. Михайленко, С.А. Сидоренко // Записки Горного института. – 2009. – Т. 190. – С. 330-334.

17. Курбацкий Е.Н. Метод решения задач строительной механики и теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.23.17 / Е.Н. Курбацкий. – МИИТ. Москва, 1995. – 205 с.

18. Левшин А.Л. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально – неоднородной Земле / А.Л. Левшин, Т. Б. Яновская, А. В. Ландер и др. – М.: Наука, 1987. – 278 с.

19. Май Дык Минь. Расчет тоннелей на сейсмические воздействия / Май Дык Минь // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Москва, 2014. –124 с.

20. Метрополитен // Wikipedia®, Wikimedia Foundation, Inc [2003]. Дата обновления: 13.10.2018. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Метрополитен> (дата обращения: 09.11.2018).

21. Московское метро // сост.: А.А. Лебедев, [1996]. Дата обновления: 08.12.2014.URL: <http://www.metro.ru/library/metropoliteny> (дата обращения: 12.09.2018).

22. Назаров Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий / Ю.П. Назаров. – М.: Наука, 2012. – 414 с.

23. Нгуен Ван Хунг. Методы расчета тоннелей, выполненных из опускных секций, на сейсмические воздействия / Нгуен Ван Хунг // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2015. – 136 с.

24. Нгуен Чи Тхань. Расчет напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений / Нгуен Чи Тхань // Известия Тульского государственного университета. – Тула, 2018. – Т. 1. – С. 296-306.

25. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П.Л. Пастернак. – М.: Москва, 1954. – 55 с.

26. Протоdjяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление / М.М. Протоdjяконов. – М.: ГНТИ. Ч. 1, 1963. –104 с.

27. Протосеня А.Г. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг / А.Г. Протосеня, Ю.Н. Огородников, П.А. Деменков, М.А. Карасев, М.О. Лебедев, Д.А. Потемкин, Е.Г. Козин // Монография. СПГГУ-МАНЭБ. – СПб, 2011. –355 с.

28. Протосеня А.Г, Карасев М.А. Механика подземных сооружений / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев. – Санкт-Петербург, 2013. –113 с.

29. СНиП II-7-81. Строительство в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 2004. – 60 с.

30. Трушко В.Л., Протосеня А.Г., Матвеев П.Ф., Совмен Х.М. Геомеханика массивов и динамика выработок глубоких рудников. – Санкт-Петербург, 2000. – 395 с.

31. Asakura T., Tsukada K., Matsunaga T., Matsuoka S., Yashiro K., Shiba Y., Oya T. Damage to mountain tunnels by earthquake and its mechanism / T. Asakura, K. Tsukada, T. Matsunaga, S. Matsuoka, K. Yashiro, Y. Shiba, T. Oya // Proceedings of JSCE (Japan Society of Civil Engineers) 659. – 2000. – P. 27-38.

32. Burns S.A., Arora J.S., Balling R., Cheng F.Y., Estes A.C., Foley C.M. Recent advances in optimal structural design/ S.A. Burns, J.S. Arora, R. Balling, F.Y. Cheng, A.C. Estes, C.M Foley // Structural Optimization: Recent Developments and Applications. – USA, 2002. – 384p.

33. Bormann P. New Manual of Seismological Observatory Practice NMSOP / P. Bormann// – USA, 2002. – 1162 p.

34. Crown H.J., James Monsees, Nasri Munfah, John Wisniewski. Technical manual for design and construction of road tunnels - civil elements / H.J. Crown, James Monsees, Nasri Munfah, John Wisniewski // Report No. FHWA-NHI-10-034. – USA, 2009. – 702 p.
35. Design report technical design, Project: Hanoi pilot light metro line 03 Section Nhon - Hanoi Railway station. Package: underground section - line and stations, package number HPLMLP/CP-03. – Hanoi, 2013. – Volume (1-2). – 73 p.
36. Dowding C.H., Rozen A. Damage to rock tunnels from earthquake shaking / C.H. Dowding, A. Rozen // Journal of Geotechnical Engineering Division. –1978. – Volume. 104. – P. 175-191.
37. Do N.A. Numerical analyses of segmental tunnel lining under static and dynamic loads / N.A Do // Doctoral thesis. – Lyon, 2014. – 363 p.
38. Diogo Miguel Mendes Ferreira Torcato. Dissertation for the degree of Master in Civil Engineering / Diogo Miguel Mendes Ferreira Torcato // Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, 2010. – 183 p.
39. Gospodarikov Alexandr, Nguyen Chi Thanh. Research and calculations linings for Hanoi metro under earthquake conditions in Hanoi with analytical methods / Gospodarikov Alexandr, Nguyen Chi Thanh // International Conference on Advances in Mining and Tunneling. – 2016. – P. 425-434.
40. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. Seismic waves and some basic parameters of the earthquake, determine parameters of earthquakes that can occur in the Hanoi's area / Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi // International Conference on Geo-spatial Technologies and Earth resources. – 2017. – P. 381-386.
41. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. Liquefaction possibility of soil layers during earthquake in Hanoi/ Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi // International Journal of GEOMATE. – 2017. – Volume. 13(39). – P. 148-155.
42. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. 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. – 2017. – Volume. 9(5). – P. 4535-4542.

43. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. The impact of earthquakes of tunnel linings: a casestudy from the Hanoi metro system / Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi // International Journal of GEOMATE. – 2018. – Volume. 14(41). – P.151-158.

44. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. 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. – 2018. – Volume. 15(48). – P. 91-98.

45. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. Different behaviour 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. – 2018. – Volume. 15(51). – P. 217-224.

46. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. Behaviour of soils under the impact of earthquakes: A study case from the center of Hanoi / Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Volume. 13(13). – P. 4126-4135.

47. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. 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. – 2018. – Volume. 9(12). – P. 871-880.

48. Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi. 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. – 2019. – Volume. 10(2). – P. 79-86.

49. Hashash Y.M., Hook J.J., Schmidt B., Yao. Seismic design and analysis of underground structure / Hashash Y.M., Hook J.J., Schmidt B., Yao// Tunn. Undergr. Sp. Technol. – 2001. – Volume 16. – P. 247-293.

50. John C.M.St., Zahrah T.F. A seismic design of underground structures / C.M.St. John, T.F. Zahrah // Tunneling Underground Space Technol. – 1987. – Volume. 2 (2). – P. 165-197.

51. Kontogianni V., Stiros S. Earthquakes and Seismic Faulting Effects on Tunnels/ V. Kontogianni, S. Stiros // Turkish Journal on Earth Sciences. – 2003. – Volume. 12. – P. 153-156.
52. Koyama Y. Present status and technology of shield tunneling method in Japan / Koyama Y // Tunneling and Underground Space Technology. – 2003. – Volume. 18. – P. 145-159.
53. Kouretzis G., Sloan S.W., Carter J.P. Effect of interface friction on tunnel liner internal forces due to seismic S- and P-wave propagation / G. Kouretzis, S.W. Sloan, J.P. Carter // Soil Dy.– 2013. – Volume. 46. – P. 41-51.
54. Kuribayashi E., Iwasaki T., Kawashima K. Dynamic behavior of a subsurface tubular structure / E. Kuribayashi, T. Iwasaki, K. Kawashima // Bulletin of the New Zealand national society for earthquake engineering. – 1974. – Volume. 7. – № 4. – P. 200-209.
55. Lanzano G., Bilotta E., Russo G. Tunnels under seismic loading: a review of damage case histories and protection methods / G. Lanzano, E. Bilotta, G. Russo // Strategy for Reduction of the Seismic Risk (Fabbrocino and Santucci de Magistris eds). – 2008. – P. 65-74.
56. Lyons A.C. The Design and Development of Segmental Tunnel Linings in the U.K. / A.C. Lyons // Proceedings of the International Tunnel Symposium on Tunneling Under Difficult Conditions. – Tokyo, 1978. – P. 162-176.
57. Nguyen L.M. The First Peak Ground Motion Attenuation Relationships for North of Vietnam / L.M. Nguyen // Journal of Asian Earth Sciences. – 2012. – Volume. 43. – P. 241-253.
58. Matsubara K., Hirasawa K., Urano K. On the wavelength for seismic design of underground pipeline structures // K. Matsubara, K. Hirasawa, K. Urano // Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. – 1995. – P. 587-590.
59. Merritt J.L., Monsees J.E., Hendron A.J. Seismic design of underground structures: Proc of the 1985 Rapid Excavation and Tunneling Conference, New York /

J.L. Merritt, J.E. Monsees, A.J. Hendron // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts. – 1985. – Volume. 23(6). – P. 255-282.

60. Mohraz B. Medium Interaction in Tunnels / B. Mohraz // Proceedings, Journal of the construction Division. – 1975. – Volume. 101. – P. 127-141.

61. Monsees J.E., Hansmire W.H. Civil Works Tunnels for Vehicles, Water, and Wastewater / J.E. Monsees, W.H. Hansmire// Chapter 24.1, SME Mining Engineering Handbook. 2nd Edition. – 1992. – P. 2109-2125.

62. Muir Wood A.M. The Circular Tunnel in Elastic Ground / A.M. Muir Wood // Geotechnique. – 1975. – Volume. 25(1). – P. 115-127.

63. Naggar H.E., Hinchberger S.D. An analytical solution for jointed tunnel linings in elastic soil or rock / Naggar H.E., S.D. Hinchberger // Canadian Geotechnical Journal. – 2008. – Volume. 45. – P. 1572-1593.

64. Naggar H.E., Hinchberger S.D. Approximate evaluation of stresses in degraded tunnel linings / Naggar H.E., S.D. Hinchberger // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2012. – Volume. 43. – P. 45-57.

65. Naggar H.E., Hinchberger S.D., Hesham M., Naggar E.I. Simplified analysis of seismic in-plane stresses in composite and jointed tunnel linings / Naggar H.E., S.D. Hinchberger, M. Hesham, E.I. Naggar // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2008. – Volume. 28(12). – P. 1063-1077.

66. Nakamura S., Yoshida N., Iwatate T. Damage to Daikai Subway Station During the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake and Its Investigation / S. Nakamura, N. Yoshida, T. Iwatate // Japan Society of Civil Engineers, Committee of Earthquake Engineering. – 1996. – P. 287-295.

67. NCHRP-12-70. Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Buried Structures, Slopes, and Embankments / NCHRP-12-70 // – USA, 2008. – 148 p.

68. Newmark N.M., Hall W.J. Development of criteria for seismic review of selected nuclear power plants. U.S. Nuc. Reg. Comm / N.M. Newmark, W. J. Hall // Report NUREG/CR-0098. – Urbana, Illinois, USA. 1978. – 55 p.

69. Newmark N.M. Problems in wave propagation in soil and rock. Proc. Int. Syrup. Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials / Newmark, N. M. // New Mexico: Univ. of New Mexico Press. – 1968. – P.7-26.
70. Ocak I. Interaction of longitudinal surface settlements for twin tunnels in shallow and soft soils: the case of Istanbul Metro / I. Ocak // Environ Earth Sci. – 2013. – Volume. 69. – P. 1673-1683.
71. Oreste P.P. A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports / P.P. Oreste // Tunnelling and Underground space technology. – 2007. – Volume. 22. – P. 185-205.
72. Oreste P.P. Analysis of structural interaction in tunnels using convergenceconfinement approach / P.P. Oreste // Tunnelling and Underground space technology. – 2003. – Volume. 18. – P. 347-363.
73. Owen G.N., Scholl R.E. Earthquake engineering of large underground structures / G.N. Owen, R.E. Scholl // Report prepared for the Federal Highway Administration, FHWAIRD-801195. – 1981. – 300 p.
74. Pakbaz M.C., Yareevand A. 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading / M.C. Pakbaz, A. Yareevand // Tunnelling and U. – 2005. – Volume. 20. – P. 411-417.
75. Paul S.L. Design Recommendations for Concrete Linings for Transportation Tunnels / S.L. Paul // Report No. UMTA-MA-06-0100-83-1 and 2, prepared for U.S. DOT, Urban Mass Transportation Administration. – 1983. – Vols. 1 and 2. – 178 p.
76. Peck R.B. Deep Excavation and Tunneling in soft Ground / Peck R.B // Proceedings of the 7th International Conference of Soil Mechanics. – Mexico, 1969. State-of-art Volume. – P. 225-290.
77. Penzien J., Wu C. Stresses in linings of bored tunnels / J. Penzien, C. Wu // Journal of Earthquake Eng. Structural Dynamics. – 1998. – Volume. 27. – P. 283-300.
78. Penzien J. Seismically induced racking of tunnel linings / J. Penzien // Journal of Earthquake Eng. Structural Dynamics. – 2000. – Volume. 29. – P. 683-691.
79. Phong N.V. Study on mechanical properties of soil in Hanoi under the effect of dynamic loads / N.V. Phong // Doctoral thesis. – Hanoi. 2016. – 176 p.

80. Plizzari G.A., Tiberti G. Steel fibers as reinforcement for precast tunnel segments / G.A. Plizzari, G. Tiberti // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2006. – Volume. 21(3). – P. 438-439.
81. Power M.S., Chang C.Y., Idriss I.M., Kennedy R.P. Engineering Characterization of Ground Motion / M.S. Power, C.Y. Chang, I.M. Idriss, R.P. Kennedy // *NUREG/CR-3805*. –1986. – Volume. 5. – 161 p.
82. Power M.S., Rosidi D., Kaneshiro J.Y. Seismic vulnerability of tunnels and underground structures revisited / M.S. Power, D.Rosidi, J.Y. Kaneshiro // *Proceedings of North American Tunneling '98*, Newport Beach, CA. – Balkema Rotterdam, 1998. – P. 243-250.
83. Reed L.M, William P.D. Theoretical Manual for Pile Foundations / Reed L.M., William P.D // *US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center*. – USA, 2000. – 165 p.
84. Schnabel P., Seed H.B., Lysmer J. Modification of seismograph records for effects of local soil conditions / P. Schnabel, H.B. Seed, J. Lysmer // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 1972. – Volume. 62(6). – P.1649-1664.
85. Scott R.F. *Foundation Analysis*. Prentice-Hall / R.F. Scott // Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632. – 1981. – 545 p.
86. Tamura I., Yamazaki F., Shabestari. Relationship between the Average S-wave Velocity and Site Amplification Ratio using K-NET Records / I. Tamura, F. Yamazaki, Shabestari // *Proceedings of Sixth International Conference on Seismic Zonation*. – 2000. – P. 447-452.
87. Takada S., Horinouchi N., Tsubakimoto T., Tsuchiya M., Ogawa Y. Earthquake resistance evaluation of service junctions in a small-diameter steel pipeline / S. Takada, N. Horinouchi, T. Tsubakimoto, M. Tsuchiya, Y. Ogawa // *Proceedings of 9th world conference on earthquake engineering*. – Tokyo-Kyoto, 1998. – Volume. 2. – P. 85-90.
88. Takano Y.H. Guidelines for the design of shield tunnel lining / Y.H. Takano // *Tunneling and Underground Space Technology*. – 2000. – Volume. 15(3). – P. 303-331.
89. Teachavorasinskun S., Chub-Uppakarn T. Experimental verification of joint

effects on segmental tunnel lining / S. Teachavorasinskun, T. Chub-Uppakarn // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2008. – Volume. 14. – P.253-264.

90. Teachavorasinskun S., Chub-Uppakarn T. Influence of segmental joints on tunnel lining / S. Teachavorasinskun, T. Chub-Uppakarn // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2010. – Volume. 25. – P. 490-494.

91. Tuan Ngo D., Nguyen M.D., Nguyen D.B. A review of the Current Vietnamese Earthquake Design Code / D. Tuan Ngo, M.D. Nguyen, D.B. Nguyen // *Special Issue of the Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE): Earthquake Engineering in the low and moderate seismic regions of Southeast Asia and Australia*. – 2008. – P. 32-41.

92. Tran Thi My Thanh. National Basic Research Program / Tran Thi My Thanh // *Institute of Geophysics*. – Hà Nội, 2011. – P. 1-28.

93. Wang J. Seismic design of tunnels / J. Wang // *Monograph 7, Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas Inc.* – New York, 1993. – 159 p.

94. Wang W.L., Wang T.T., Su J.J., Lin C.H., Seng C. R., Huang T.H. Assesment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake / Wang W.L. Wang, T.T. Wang, J.J. Su, C.H. Lin, C.R. Seng, T.H. Huang // *Tunneling and Underground Space Technology*. – 2001. – Volume. 16. – P.133-150.

95. Wang Z.Z., Zhang Z.. Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake / Z. Z. Wang, Z. Zhang // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2013. – Volume. 45. – P. 45-55.

96. Wittke W., Druffel R., Erichsen C., Gattermann J., Kiehl J., Schmidt D. Stability analysis and design for mechanized tunneling / W. Wittke, R. Druffel, C. Erichsen, J. Gattermann, J. Kiehl, D. Schmidt // (W. WBI Professor Dr.-Ing. Wittke, Éd.) *Grundbau und Felsbau GmbH*. – Aachen, 2007. – 547 p.

97. Xu Huang, Hongwei Huang, Jie Zhang. Flattening of jointed shield-driven tunnel induced by longitudinal differential settlements / Xu Huang, Hongwei Huang, Jie Zhang // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2012. – Volume. 31. – P. 20-32.

98. Yang X.L., Wang J.M. Ground movement prediction for tunnels using

simplified procedure// X.L. Yang, J.M Wang// Tunnelling and Underground Space Technology. – 2011. – Volume. 26. – P. 462-471.

99. Yi-Chuan Chou, Yun-Mei Hsiung. A Normalized Equation of Axially Loaded Piles in Elasto-Plastic Soil / Yi-Chuan Chou, Yun-Mei Hsiung // Journal of GeoEngineering. – 2009. – Volume. 4. – № 1. – P. 1-7.

100. Zuhair Kadhim JahanGer. Relation between standerd penetration test and skin resistance of driven concrete pile in over-consolidated clay soil / Zuhair Kadhim JahanGer // Journal of Engineering. – 2011. – Volume 17. – № 5. – P. 65 - 78.

101. Zheng Shengbao, Jiang Shuping, Wang Xiaowen, Lin Zhi. The Theory Research of Tunnels Seismic Damage / Zheng Shengbao, Jiang Shuping, Wang Xiaowen, Lin Zhi // Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice. – 2012. – Volume. 162. – P. 1-11.

102. Zhang J., Mei Z., Quan X. Failure Characteristics and Influencing Factors of Highway Tunnel Damage due to Earthquakes / J. Zhang, Z. Mei, X. Quan // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2013. – Volume. 18. – P. 973-986.

103. Zhang Z., Huang M. Geotechnical influence on existing subway tunnels induced by multiline tunnelling in Shanghai soft soil / Z. Zhang, M. Huang // Computers and Geotechnics. – 2014. – Volume. 56. – P. 121-132.

104. Zheng Y., Qiu W. 3-D FEM analysis of closely spaced vertical twin tunnel. Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future – Erdem and Solak (eds) / Y. Zheng, W. Qiu // Taylor and Francis Group. – London, 2005. – P. 1155-1160.

105. Zheng-Rong H., Wei Z., Jing-Hua L., Jian L., Rui. J. Three dimensional numerical modelling of shield tunnel lining / H. Zheng-Rong, Z. Wei, L. Jing-Hua, L. Jian, J. Rui // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2006. – Volume. 21. – P. 412-434.

106. Zhong X., Zhu W., Huang Z., Han Y. Effect of joint structure on joint stiffness for shield tunnel lining / X. Zhong, W. Zhu, Z. Huang, Y. Han // Tunneling and Underground Space Technology. – 2006. – Volume. 21. – P. 406-407.

107. Zhou J.Y. The analysis of segmental circular tunnel lining / J.Y. Zhou //

Underground Engineering and Tunnels. – 1988. – Volume. 4. – P. 2-6.

108. Zhu W., Huang Z. G., Zhong X. C., Kou X. Q. Modification of key parameters of longitudinal equivalent model for shield tunnel / W. Zhu, Z.G. Huang, X.C. Zhong, X.Q. Kou // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground-proceedings of the 6th international symposium (is-shanghai 2008). – Shanghai, China, 2008. – P.863-868.

## Приложение А

### Метод HRM - данные, рассчитанные для обделки тоннеля под воздействием землетрясения, под углом 0°.

Случай 1: обделка тоннеля представляет собой монолит.

$u_1$  – перемещение обделки в направлении радиуса, м;  $u_2$  – перемещение обделки в тангенциальном направлении, м;

$M$  – изгибающий момент;  $T$  – продольная сила, кН.

Угол, градус	M, Нм	M, кНм	T, Н	T, кН	V, Н	V, кН	$u_1$ , м	$u_2$ , м
0	0.078084	78.08363	0.025551	25.55053	0.000924	0.923972	-0.00056	0.00199
1	0.078033	78.03283	0.025551	25.55053	-0.00092	-0.92397	-0.00243	0.001988
2	0.07788	77.87953	0.025616	25.61607	-0.00279	-2.78852	-0.0043	0.001984
3	0.077624	77.62395	0.025748	25.74773	-0.00465	-4.64905	-0.00617	0.001977
4	0.077266	77.26644	0.025946	25.94579	-0.0065	-6.50291	-0.00803	0.001968
5	0.076808	76.80754	0.02621	26.21042	-0.00835	-8.34741	-0.00988	0.001957
6	0.076248	76.24789	0.026542	26.54166	-0.01018	-10.1799	-0.01171	0.001943
7	0.075588	75.5883	0.026939	26.93943	-0.012	-11.9977	-0.01353	0.001927
8	0.07483	74.82974	0.027404	27.40353	-0.0138	-13.7981	-0.01534	0.001909
9	0.073973	73.97329	0.027934	27.93364	-0.01558	-15.5786	-0.01712	0.001889
10	0.07302	73.0202	0.028529	28.52935	-0.01734	-17.3364	-0.01889	0.001866
11	0.071972	71.97186	0.02919	29.19009	-0.01907	-19.0692	-0.02062	0.00184
12	0.07083	70.82978	0.029915	29.91523	-0.02077	-20.7741	-0.02234	0.001813
13	0.069596	69.59563	0.030704	30.70399	-0.02245	-22.4488	-0.02402	0.001784
14	0.068271	68.27122	0.031556	31.55551	-0.02409	-24.0908	-0.02568	0.001752
15	0.066858	66.85847	0.032469	32.46881	-0.0257	-25.6975	-0.0273	0.001718
16	0.065359	65.35946	0.033443	33.44282	-0.02727	-27.2666	-0.02888	0.001682
17	0.063776	63.77639	0.034476	34.47637	-0.0288	-28.7957	-0.03043	0.001644
18	0.062112	62.11158	0.035568	35.56817	-0.03028	-30.2825	-0.03194	0.001605
19	0.060367	60.36748	0.036717	36.71686	-0.03172	-31.7247	-0.03341	0.001563
20	0.058547	58.54668	0.037921	37.92098	-0.03312	-33.1201	-0.03484	0.001519
21	0.056652	56.65184	0.039179	39.17898	-0.03447	-34.4665	-0.03622	0.001474
22	0.054686	54.6858	0.040489	40.48922	-0.03576	-35.7619	-0.03755	0.001427
23	0.052651	52.65145	0.04185	41.84999	-0.037	-37.0042	-0.03884	0.001378
24	0.050552	50.55184	0.043259	43.25947	-0.03819	-38.1915	-0.04008	0.001327
25	0.04839	48.39008	0.044716	44.71579	-0.03932	-39.3219	-0.04127	0.001275
26	0.046169	46.16941	0.046217	46.217	-0.04039	-40.3935	-0.0424	0.001222
27	0.043893	43.89315	0.047761	47.76106	-0.0414	-41.4046	-0.04348	0.001167
28	0.041565	41.56472	0.049346	49.34588	-0.04235	-42.3535	-0.04451	0.00111
29	0.001045	1.044962	0.050969	50.96929	-0.0182	-18.2049	-0.04578	0.001053
30	0.036765	36.76547	0.052629	52.62909	-0.04406	-44.0586	-0.04699	0.000993
31	0.034302	34.30189	0.054323	54.32297	-0.04481	-44.8119	-0.04784	0.000933
32	0.031801	31.80064	0.056049	56.0486	-0.0455	-45.4971	-0.04864	0.000871

33	0.029266	29.26552	0.057804	57.8036	-0.04611	-46.1131	-0.04937	0.000808
34	0.0267	26.70041	0.059586	59.58552	-0.04666	-46.6587	-0.05004	0.000745
35	0.024109	24.10924	0.061392	61.39187	-0.04713	-47.1327	-0.05065	0.000681
36	0.021496	21.496	0.06322	63.22015	-0.04753	-47.5343	-0.0512	0.000615
37	0.018865	18.8647	0.065068	65.06777	-0.04786	-47.8626	-0.05168	0.00055
38	0.016219	16.21944	0.066932	66.93215	-0.04812	-48.1167	-0.0521	0.000483
39	0.013564	13.56432	0.068811	68.81065	-0.0483	-48.296	-0.05246	0.000416
40	0.010903	10.90349	0.070701	70.70062	-0.0484	-48.3999	-0.05275	0.000349
41	0.008241	8.241115	0.072599	72.59938	-0.04843	-48.4279	-0.05298	0.000281
42	0.005581	5.581402	0.074504	74.50424	-0.04838	-48.3795	-0.05315	0.000213
43	0.002929	2.928556	0.076412	76.41247	-0.04825	-48.2546	-0.05325	0.000145
44	0.000287	0.2868	0.078321	78.32137	-0.04805	-48.0529	-0.05329	7.67E-05
45	-0.00234	-2.33964	0.080228	80.22818	-0.04777	-47.7743	-0.05326	8.36E-06
46	-0.00495	-4.94654	0.08213	82.13019	-0.04742	-47.4188	-0.05318	-6E-05
47	-0.00753	-7.53266	0.084025	84.02512	-0.04704	-47.0409	-0.05303	-0.00013
48	-0.0101	-10.097	0.085911	85.91122	-0.04664	-46.6447	-0.05282	-0.0002
49	-0.01264	-12.6384	0.087787	87.78676	-0.04623	-46.2271	-0.05254	-0.00026
50	-0.01516	-15.1555	0.08965	89.64995	-0.04579	-45.7852	-0.05221	-0.00033
51	-0.01765	-17.6468	0.091499	91.49896	-0.04532	-45.3162	-0.05182	-0.0004
52	-0.02011	-20.1107	0.093332	93.33193	-0.04482	-44.818	-0.05136	-0.00046
53	-0.02255	-22.5455	0.095147	95.14699	-0.04429	-44.2886	-0.05085	-0.00053
54	-0.02495	-24.9494	0.096942	96.94221	-0.04373	-43.726	-0.05028	-0.00059
55	-0.02732	-27.3204	0.098716	98.71569	-0.04313	-43.1289	-0.04966	-0.00066
56	-0.02966	-29.6567	0.100465	100.4655	-0.0425	-42.4959	-0.04897	-0.00072
57	-0.03196	-31.9561	0.10219	102.1897	-0.04183	-41.8258	-0.04823	-0.00078
58	-0.03422	-34.2166	0.103886	103.8864	-0.04112	-41.118	-0.04744	-0.00085
59	-0.03632	-36.3176	0.105554	105.5536	-0.06365	-63.6475	-0.0463	-0.00091
60	-0.03861	-38.6124	0.107189	107.1895	-0.03959	-39.5861	-0.04513	-0.00096
61	-0.04074	-40.7433	0.108792	108.7922	-0.03876	-38.761	-0.04418	-0.00102
62	-0.04283	-42.8267	0.11036	110.3598	-0.0379	-37.8962	-0.04317	-0.00108
63	-0.04486	-44.8603	0.11189	111.8904	-0.03699	-36.9916	-0.04212	-0.00113
64	-0.04684	-46.8421	0.113382	113.3824	-0.03605	-36.0475	-0.04102	-0.00119
65	-0.04877	-48.7697	0.114834	114.834	-0.03506	-35.0641	-0.03987	-0.00124
66	-0.05064	-50.6412	0.116243	116.2434	-0.03404	-34.0419	-0.03868	-0.00129
67	-0.05245	-52.4544	0.117609	117.609	-0.03298	-32.9815	-0.03745	-0.00134
68	-0.05421	-54.2073	0.118929	118.9291	-0.03188	-31.8835	-0.03617	-0.00139
69	-0.0559	-55.8977	0.120202	120.2023	-0.03075	-30.7488	-0.03485	-0.00143
70	-0.05752	-57.5238	0.121427	121.427	-0.02958	-29.5783	-0.03348	-0.00148
71	-0.05908	-59.0836	0.122602	122.6018	-0.02837	-28.373	-0.03209	-0.00152
72	-0.06058	-60.5753	0.123725	123.7253	-0.02713	-27.1339	-0.03065	-0.00156
73	-0.062	-61.9972	0.124796	124.7962	-0.02586	-25.8625	-0.02918	-0.0016
74	-0.06335	-63.3474	0.125813	125.8134	-0.02456	-24.5598	-0.02768	-0.00163
75	-0.06462	-64.6243	0.126776	126.7756	-0.02323	-23.2274	-0.02614	-0.00167
76	-0.06583	-65.8265	0.127682	127.6819	-0.02187	-21.8667	-0.02458	-0.0017
77	-0.06695	-66.9523	0.128531	128.5311	-0.02048	-20.4791	-0.02298	-0.00173
78	-0.068	-68.0005	0.129322	129.3225	-0.01907	-19.0664	-0.02137	-0.00176

79	-0.06897	-68.9697	0.130055	130.0551	-0.01763	-17.6301	-0.01972	-0.00179
80	-0.06986	-69.8588	0.130728	130.7284	-0.01617	-16.172	-0.01806	-0.00181
81	-0.07067	-70.6666	0.131342	131.3416	-0.01469	-14.6938	-0.01637	-0.00183
82	-0.07139	-71.3922	0.131894	131.8943	-0.0132	-13.1973	-0.01467	-0.00185
83	-0.07203	-72.0345	0.132386	132.3859	-0.01168	-11.6844	-0.01295	-0.00187
84	-0.07259	-72.5929	0.132816	132.8162	-0.01016	-10.1569	-0.01121	-0.00189
85	-0.07307	-73.0666	0.133185	133.185	-0.00862	-8.61685	-0.00947	-0.0019
86	-0.07346	-73.4551	0.133492	133.492	-0.00707	-7.06604	-0.00771	-0.00191
87	-0.07376	-73.7578	0.133737	133.7373	-0.00551	-5.50648	-0.00594	-0.00192
88	-0.07397	-73.9744	0.133921	133.921	-0.00394	-3.94013	-0.00417	-0.00192
89	-0.00198	-1.97605	0.134043	134.0432	-0.04971	-49.7083	-0.00181	-0.00193
90	-0.07415	-74.1484	0.134104	134.1043	-0.00079	-0.79498	0.000531	-0.00193
91	-0.07411	-74.1055	0.134105	134.1046	0.00078	0.780142	0.002309	-0.00193
92	-0.07398	-73.976	0.134044	134.0442	0.002354	2.354411	0.004085	-0.00192
93	-0.07376	-73.7602	0.133923	133.9226	0.003926	3.925852	0.005857	-0.00192
94	-0.07346	-73.4583	0.13374	133.7396	0.005492	5.492483	0.007623	-0.00191
95	-0.07307	-73.0705	0.133495	133.4949	0.007052	7.052327	0.009381	-0.0019
96	-0.0726	-72.5976	0.133188	133.1884	0.008603	8.603417	0.011128	-0.00188
97	-0.07204	-72.0399	0.13282	132.8202	0.010144	10.1438	0.012863	-0.00187
98	-0.0714	-71.3982	0.13239	132.3905	0.011672	11.67154	0.014583	-0.00185
99	-0.07067	-70.6734	0.131899	131.8993	0.013185	13.18473	0.016288	-0.00183
100	-0.06987	-69.8663	0.131347	131.3472	0.014681	14.68149	0.017973	-0.00181
101	-0.06898	-68.9779	0.130734	130.7344	0.01616	16.15997	0.019639	-0.00179
102	-0.06801	-68.0093	0.130062	130.0617	0.017618	17.61837	0.021282	-0.00176
103	-0.06696	-66.9617	0.129329	129.3294	0.019055	19.05493	0.022901	-0.00173
104	-0.06584	-65.8365	0.128539	128.5385	0.020468	20.46794	0.024494	-0.0017
105	-0.06463	-64.6349	0.12769	127.6897	0.021856	21.85574	0.026059	-0.00167
106	-0.06336	-63.3586	0.126784	126.7839	0.023217	23.21675	0.027594	-0.00163
107	-0.06201	-62.0089	0.125822	125.8221	0.024549	24.54942	0.029098	-0.0016
108	-0.06059	-60.5877	0.124805	124.8053	0.025852	25.8523	0.030568	-0.00156
109	-0.0591	-59.0965	0.123735	123.7347	0.027124	27.12401	0.032004	-0.00152
110	-0.05754	-57.5372	0.122612	122.6116	0.028363	28.36324	0.033403	-0.00148
111	-0.05591	-55.9116	0.121437	121.4372	0.029569	29.56879	0.034764	-0.00143
112	-0.05422	-54.2217	0.120213	120.2128	0.03074	30.73954	0.036085	-0.00139
113	-0.05247	-52.4694	0.11894	118.94	0.031874	31.87445	0.037364	-0.00134
114	-0.05066	-50.6567	0.11762	117.6202	0.032973	32.9726	0.038601	-0.00129
115	-0.04879	-48.7857	0.116255	116.2549	0.034033	34.03319	0.039794	-0.00124
116	-0.04686	-46.8584	0.114846	114.8459	0.035056	35.05553	0.040941	-0.00119
117	-0.04488	-44.8772	0.113395	113.3946	0.036039	36.03903	0.042042	-0.00113
118	-0.04284	-42.844	0.111903	111.9029	0.036983	36.98326	0.043094	-0.00108
119	-0.04063	-40.6285	0.110373	110.3725	0.037849	37.84902	0.044119	-0.00102
120	-0.03863	-38.6306	0.108805	108.8052	0.038753	38.75278	0.045168	-0.00096
121	-0.03645	-36.4547	0.107203	107.2028	0.039578	39.57815	0.046181	-0.00091
122	-0.03424	-34.2357	0.105567	105.5672	0.040364	40.36416	0.047149	-0.00085
123	-0.03198	-31.9755	0.1039	103.9002	0.041111	41.11116	0.048123	-0.00078
124	-0.02968	-29.6765	0.102204	102.2038	0.04182	41.81962	0.048962	-0.00072

125	-0.02734	-27.3405	0.10048	100.4799	0.04249	42.49024	0.049646	-0.00066
126	-0.02497	-24.9697	0.09873	98.73027	0.043124	43.1239	0.050274	-0.00059
127	-0.02257	-22.5661	0.096957	96.95699	0.043722	43.72168	0.050844	-0.00053
128	-0.02013	-20.1315	0.095162	95.16195	0.044285	44.28489	0.051356	-0.00046
129	-0.01767	-17.6677	0.093347	93.34706	0.044815	44.81506	0.051809	-0.0004
130	-0.01518	-15.1766	0.091514	91.51424	0.045314	45.31396	0.052203	-0.00033
131	-0.01266	-12.6596	0.089665	89.66536	0.045784	45.78362	0.052537	-0.00026
132	-0.01012	-10.1182	0.087802	87.80229	0.046226	46.22635	0.05281	-0.0002
133	-0.00755	-7.55387	0.085927	85.92685	0.046645	46.64475	0.053022	-0.00013
134	-0.00497	-4.96771	0.084041	84.04084	0.047042	47.04173	0.053173	-5.9E-05
135	-0.00236	-2.36072	0.082146	82.14598	0.047421	47.42052	0.05326	8.86E-06
136	0.000266	0.26584	0.080244	80.24403	0.047776	47.77643	0.053286	7.72E-05
137	0.002908	2.907736	0.078337	78.33725	0.048055	48.05546	0.053248	0.000145
138	0.005561	5.560746	0.076428	76.42839	0.048258	48.2576	0.053146	0.000214
139	0.008221	8.220648	0.07452	74.52016	0.048383	48.38295	0.052981	0.000282
140	0.010883	10.88323	0.072615	72.6153	0.048432	48.43171	0.052752	0.000349
141	0.013544	13.5443	0.070717	70.71652	0.048404	48.40416	0.052459	0.000417
142	0.0162	16.19968	0.068827	68.82652	0.048301	48.3007	0.052102	0.000484
143	0.018845	18.84522	0.066948	66.94798	0.048122	48.12183	0.051681	0.00055
144	0.021477	21.47682	0.065084	65.08354	0.047868	47.86813	0.051198	0.000616
145	0.02409	24.0904	0.063236	63.23584	0.04754	47.54029	0.050651	0.000681
146	0.026682	26.68192	0.061407	61.40748	0.047139	47.13911	0.050042	0.000746
147	0.029247	29.2474	0.059601	59.60102	0.046665	46.66545	0.049371	0.000809
148	0.031783	31.78291	0.057819	57.81899	0.04612	46.12031	0.048639	0.000872
149	0.000914	0.914219	0.056064	56.06386	0.067406	67.40632	0.047576	0.000933
150	0.036749	36.74859	0.054338	54.33809	0.04482	44.81988	0.046464	0.000993
151	0.039171	39.17122	0.052644	52.64405	0.044067	44.06702	0.045553	0.001052
152	0.041549	41.54879	0.050984	50.9841	0.043247	43.24747	0.044585	0.00111
153	0.043878	43.87772	0.049361	49.3605	0.042363	42.36266	0.043561	0.001167
154	0.046155	46.1545	0.047775	47.7755	0.041414	41.41409	0.042481	0.001222
155	0.048376	48.37572	0.046231	46.23124	0.040403	40.40335	0.041347	0.001275
156	0.050538	50.53804	0.04473	44.72983	0.039332	39.33211	0.04016	0.001327
157	0.052638	52.63824	0.043273	43.27329	0.038202	38.20211	0.038923	0.001378
158	0.054673	54.67319	0.041864	41.86359	0.037015	37.01518	0.037636	0.001427
159	0.05664	56.63985	0.040503	40.50259	0.035773	35.7732	0.0363	0.001474
160	0.058535	58.53532	0.039192	39.1921	0.034478	34.47813	0.034919	0.00152
161	0.060357	60.35679	0.037934	37.93385	0.033132	33.13201	0.033493	0.001563
162	0.062102	62.10156	0.036729	36.72947	0.031737	31.73693	0.032024	0.001605
163	0.063767	63.76706	0.035581	35.58051	0.030295	30.29504	0.030514	0.001645
164	0.065351	65.35084	0.034488	34.48843	0.028809	28.80856	0.028965	0.001683
165	0.066851	66.85057	0.033455	33.45459	0.02728	27.27974	0.02738	0.001719
166	0.068264	68.26405	0.03248	32.48029	0.025711	25.71092	0.025759	0.001753
167	0.069589	69.58922	0.031567	31.56668	0.024104	24.10446	0.024105	0.001785
168	0.070824	70.82413	0.030715	30.71485	0.022463	22.46277	0.022421	0.001814
169	0.071967	71.96699	0.029926	29.92576	0.020788	20.78831	0.020708	0.001842
170	0.073016	73.01613	0.0292	29.2003	0.019084	19.08357	0.018969	0.001867

171	0.07397	73.97002	0.028539	28.53922	0.017351	17.35109	0.017206	0.00189
172	0.074827	74.82729	0.027943	27.94317	0.015593	15.59342	0.015421	0.001911
173	0.075587	75.58668	0.027413	27.4127	0.013813	13.81316	0.013617	0.001929
174	0.076247	76.2471	0.026948	26.94824	0.012013	12.01291	0.011796	0.001945
175	0.076808	76.8076	0.02655	26.5501	0.010195	10.19531	0.00996	0.001959
176	0.077267	77.26736	0.026218	26.21848	0.008363	8.363009	0.008112	0.00197
177	0.077626	77.62574	0.025953	25.95346	0.006519	6.518668	0.006254	0.001979
178	0.077882	77.8822	0.025755	25.75499	0.004665	4.664957	0.004389	0.001986
179	0.077783	77.78256	0.025623	25.62292	0.052656	52.65557	0.001902	0.00199
180	0.078088	78.08806	0.025557	25.55696	0.00094	0.94013	-0.00056	0.001991
181	0.078037	78.03718	0.025557	25.5567	-0.00093	-0.92564	-0.00243	0.001989
182	0.077884	77.88379	0.025622	25.62213	-0.00279	-2.79008	-0.0043	0.001985
183	0.077628	77.62812	0.025754	25.75368	-0.00465	-4.65052	-0.00617	0.001978
184	0.077271	77.27054	0.025952	25.95162	-0.0065	-6.50429	-0.00803	0.001969
185	0.076812	76.81156	0.026216	26.21612	-0.00835	-8.34872	-0.00988	0.001958
186	0.076252	76.25185	0.026547	26.54723	-0.01018	-10.1811	-0.01171	0.001945
187	0.075592	75.5922	0.026945	26.94486	-0.012	-11.9988	-0.01353	0.001929
188	0.074834	74.83357	0.027409	27.40882	-0.0138	-13.7992	-0.01534	0.00191
189	0.073977	73.97706	0.027939	27.93879	-0.01558	-15.5796	-0.01712	0.00189
190	0.073024	73.02392	0.028534	28.53434	-0.01734	-17.3375	-0.01889	0.001867
191	0.071976	71.97552	0.029195	29.19494	-0.01907	-19.0702	-0.02063	0.001841
192	0.070833	70.83338	0.02992	29.91992	-0.02078	-20.7751	-0.02234	0.001814
193	0.069599	69.59918	0.030709	30.70853	-0.02245	-22.4498	-0.02402	0.001785
194	0.068275	68.27472	0.03156	31.5599	-0.02409	-24.0918	-0.02568	0.001753
195	0.066862	66.86192	0.032473	32.47305	-0.0257	-25.6985	-0.0273	0.001719
196	0.065363	65.36285	0.033447	33.44691	-0.02727	-27.2676	-0.02888	0.001683
197	0.06378	63.77972	0.03448	34.4803	-0.0288	-28.7967	-0.03043	0.001645
198	0.062115	62.11486	0.035572	35.57195	-0.03028	-30.2835	-0.03194	0.001606
199	0.060371	60.3707	0.03672	36.7205	-0.03173	-31.7257	-0.03341	0.001564
200	0.05855	58.54983	0.037924	37.92447	-0.03312	-33.1212	-0.03484	0.00152
201	0.056655	56.65494	0.039182	39.18233	-0.03447	-34.4677	-0.03622	0.001475
202	0.054689	54.68882	0.040492	40.49243	-0.03576	-35.7631	-0.03756	0.001428
203	0.052654	52.65441	0.041853	41.85306	-0.03701	-37.0055	-0.03884	0.001379
204	0.050555	50.55472	0.043262	43.26241	-0.03819	-38.1928	-0.04008	0.001328
205	0.048393	48.39288	0.044719	44.7186	-0.03932	-39.3233	-0.04127	0.001276
206	0.046172	46.17213	0.04622	46.21968	-0.04039	-40.395	-0.0424	0.001223
207	0.043896	43.89579	0.047764	47.76362	-0.04141	-41.4061	-0.04348	0.001168
208	0.041567	41.56727	0.049348	49.34833	-0.04236	-42.3552	-0.04451	0.001111
209	0.001045	1.045027	0.050972	50.97164	-0.01821	-18.2052	-0.04579	0.001054
210	0.036768	36.76781	0.052631	52.63132	-0.04406	-44.0605	-0.04699	0.000994
211	0.034304	34.30412	0.054325	54.32511	-0.04481	-44.8139	-0.04785	0.000934
212	0.031803	31.80276	0.056051	56.05065	-0.0455	-45.4992	-0.04864	0.000872
213	0.029268	29.26752	0.057806	57.80555	-0.04612	-46.1153	-0.04937	0.000809
214	0.026702	26.70228	0.059587	59.58739	-0.04666	-46.661	-0.05004	0.000746
215	0.024111	24.11098	0.061394	61.39368	-0.04714	-47.1352	-0.05065	0.000681
216	0.021498	21.49759	0.063222	63.22188	-0.04754	-47.5369	-0.0512	0.000616

217	0.018866	18.86615	0.065069	65.06944	-0.04787	-47.8653	-0.05168	0.00055
218	0.016221	16.22073	0.066934	66.93376	-0.04812	-48.1195	-0.05211	0.000484
219	0.013565	13.56544	0.068812	68.81222	-0.0483	-48.299	-0.05246	0.000417
220	0.010904	10.90444	0.070702	70.70214	-0.0484	-48.403	-0.05276	0.00035
221	0.008242	8.241892	0.072601	72.60087	-0.04843	-48.4311	-0.05299	0.000282
222	0.005582	5.581993	0.074506	74.5057	-0.04838	-48.3829	-0.05315	0.000214
223	0.002929	2.928953	0.076414	76.41391	-0.04826	-48.2581	-0.05325	0.000146
224	0.000287	0.286996	0.078323	78.32279	-0.04806	-48.0566	-0.05329	7.74E-05
225	-0.00234	-2.33965	0.08023	80.2296	-0.04778	-47.7781	-0.05327	9.11E-06
226	-0.00495	-4.94677	0.082132	82.13161	-0.04742	-47.4228	-0.05318	-5.9E-05
227	-0.00753	-7.53308	0.084027	84.02653	-0.04704	-47.0443	-0.05303	-0.00013
228	-0.0101	-10.0976	0.085913	85.91263	-0.04665	-46.6477	-0.05282	-0.0002
229	-0.01264	-12.6391	0.087788	87.78816	-0.04623	-46.2297	-0.05255	-0.00026
230	-0.01516	-15.1563	0.089651	89.65134	-0.04579	-45.7874	-0.05221	-0.00033
231	-0.01765	-17.6477	0.0915	91.50034	-0.04532	-45.3181	-0.05182	-0.0004
232	-0.02011	-20.1117	0.093333	93.33331	-0.04482	-44.8196	-0.05137	-0.00046
233	-0.02255	-22.5466	0.095148	95.14835	-0.04429	-44.2898	-0.05085	-0.00053
234	-0.02495	-24.9505	0.096944	96.94355	-0.04373	-43.727	-0.05029	-0.00059
235	-0.02732	-27.3216	0.098717	98.71701	-0.04313	-43.1297	-0.04966	-0.00066
236	-0.02966	-29.6579	0.100467	100.4668	-0.0425	-42.4965	-0.04897	-0.00072
237	-0.03196	-31.9574	0.102191	102.191	-0.04183	-41.8263	-0.04824	-0.00078
238	-0.03422	-34.2179	0.103888	103.8876	-0.04112	-41.1182	-0.04744	-0.00085
239	-0.03632	-36.3188	0.105555	105.5548	-0.06365	-63.6485	-0.04631	-0.00091
240	-0.03861	-38.6136	0.107191	107.1907	-0.03959	-39.586	-0.04513	-0.00096
241	-0.04074	-40.7445	0.108793	108.7934	-0.03876	-38.7609	-0.04418	-0.00102
242	-0.04283	-42.8279	0.110361	110.361	-0.0379	-37.8959	-0.04318	-0.00108
243	-0.04486	-44.8615	0.111892	111.8917	-0.03699	-36.9913	-0.04212	-0.00113
244	-0.04684	-46.8433	0.113384	113.3836	-0.03605	-36.0471	-0.04102	-0.00119
245	-0.04877	-48.7709	0.114835	114.8352	-0.03506	-35.0636	-0.03988	-0.00124
246	-0.05064	-50.6424	0.116245	116.2446	-0.03404	-34.0414	-0.03868	-0.00129
247	-0.05246	-52.4555	0.11761	117.6101	-0.03298	-32.9809	-0.03745	-0.00134
248	-0.05421	-54.2083	0.11893	118.9303	-0.03188	-31.8829	-0.03617	-0.00139
249	-0.0559	-55.8987	0.120203	120.2034	-0.03075	-30.7481	-0.03485	-0.00143
250	-0.05752	-57.5248	0.121428	121.4281	-0.02958	-29.5775	-0.03349	-0.00148
251	-0.05908	-59.0846	0.122603	122.6029	-0.02837	-28.3722	-0.03209	-0.00152
252	-0.06058	-60.5763	0.123726	123.7264	-0.02713	-27.1331	-0.03065	-0.00156
253	-0.062	-61.998	0.124797	124.7973	-0.02586	-25.8616	-0.02918	-0.0016
254	-0.06335	-63.3482	0.125814	125.8144	-0.02456	-24.559	-0.02768	-0.00163
255	-0.06463	-64.6251	0.126777	126.7766	-0.02323	-23.2266	-0.02614	-0.00167
256	-0.06583	-65.8272	0.127683	127.6829	-0.02187	-21.8658	-0.02458	-0.0017
257	-0.06695	-66.953	0.128532	128.5321	-0.02048	-20.4782	-0.02299	-0.00173
258	-0.068	-68.0011	0.129323	129.3234	-0.01907	-19.0655	-0.02137	-0.00176
259	-0.06897	-68.9703	0.130056	130.056	-0.01763	-17.6292	-0.01973	-0.00179
260	-0.06986	-69.8593	0.130729	130.7293	-0.01617	-16.1711	-0.01806	-0.00181
261	-0.07067	-70.6671	0.131342	131.3424	-0.01469	-14.6928	-0.01637	-0.00183
262	-0.07139	-71.3926	0.131895	131.8951	-0.0132	-13.1964	-0.01467	-0.00185

263	-0.07203	-72.0349	0.132387	132.3866	-0.01168	-11.6834	-0.01295	-0.00187
264	-0.07259	-72.5932	0.132817	132.8169	-0.01016	-10.156	-0.01122	-0.00189
265	-0.07307	-73.0669	0.133186	133.1856	-0.00862	-8.61587	-0.00947	-0.0019
266	-0.07346	-73.4553	0.133493	133.4925	-0.00707	-7.06506	-0.00771	-0.00191
267	-0.07376	-73.758	0.133738	133.7377	-0.00551	-5.50549	-0.00594	-0.00192
268	-0.07397	-73.9745	0.133921	133.9213	-0.00394	-3.93914	-0.00417	-0.00192
269	-0.00198	-1.97605	0.134043	134.0434	-0.04971	-49.7074	-0.00181	-0.00193
270	-0.07415	-74.1484	0.134104	134.1044	-0.00079	-0.79399	0.000529	-0.00193
271	-0.07411	-74.1054	0.134105	134.1046	0.000781	0.78113	0.002307	-0.00193
272	-0.07398	-73.9759	0.134044	134.044	0.002355	2.355399	0.004083	-0.00192
273	-0.07376	-73.76	0.133922	133.9223	0.003927	3.926837	0.005855	-0.00192
274	-0.07346	-73.458	0.133739	133.7392	0.005493	5.493464	0.007621	-0.00191
275	-0.07307	-73.0703	0.133494	133.4944	0.007053	7.053304	0.009379	-0.0019
276	-0.0726	-72.5972	0.133188	133.1878	0.008604	8.604388	0.011126	-0.00189
277	-0.07204	-72.0395	0.13282	132.8196	0.010145	10.14476	0.012861	-0.00187
278	-0.0714	-71.3978	0.13239	132.3898	0.011672	11.6725	0.014581	-0.00185
279	-0.07067	-70.6729	0.131899	131.8986	0.013186	13.18568	0.016285	-0.00183
280	-0.06987	-69.8657	0.131346	131.3464	0.014682	14.68243	0.017971	-0.00181
281	-0.06898	-68.9773	0.130734	130.7336	0.016161	16.1609	0.019637	-0.00179
282	-0.06801	-68.0086	0.130061	130.0608	0.017619	17.61929	0.02128	-0.00176
283	-0.06696	-66.961	0.129329	129.3285	0.019056	19.05584	0.022899	-0.00173
284	-0.06584	-65.8357	0.128538	128.5376	0.020469	20.46884	0.024491	-0.0017
285	-0.06463	-64.6341	0.127689	127.6887	0.021857	21.85663	0.026056	-0.00167
286	-0.06336	-63.3577	0.126783	126.7829	0.023218	23.21761	0.027592	-0.00163
287	-0.06201	-62.0081	0.125821	125.821	0.02455	24.55026	0.029095	-0.0016
288	-0.06059	-60.5867	0.124804	124.8043	0.025853	25.85312	0.030566	-0.00156
289	-0.0591	-59.0955	0.123734	123.7337	0.027125	27.1248	0.032001	-0.00152
290	-0.05754	-57.5362	0.122611	122.6105	0.028364	28.36401	0.0334	-0.00148
291	-0.05591	-55.9106	0.121436	121.4361	0.02957	29.56953	0.034761	-0.00143
292	-0.05422	-54.2206	0.120212	120.2117	0.03074	30.74023	0.036082	-0.00139
293	-0.05247	-52.4682	0.118939	118.9389	0.031875	31.8751	0.037362	-0.00134
294	-0.05066	-50.6555	0.117619	117.6191	0.032973	32.97321	0.038599	-0.00129
295	-0.04878	-48.7845	0.116254	116.2538	0.034034	34.03374	0.039792	-0.00124
296	-0.04686	-46.8572	0.114845	114.8447	0.035056	35.05601	0.040939	-0.00119
297	-0.04488	-44.8759	0.113393	113.3934	0.036039	36.03945	0.042039	-0.00113
298	-0.04284	-42.8427	0.111902	111.9017	0.036984	36.98359	0.043091	-0.00108
299	-0.04063	-40.6272	0.110371	110.3713	0.01185	11.85007	0.044416	-0.00102
300	-0.03863	-38.6293	0.108804	108.804	0.038753	38.75291	0.045677	-0.00097
301	-0.03645	-36.4534	0.107202	107.2016	0.039578	39.57817	0.046578	-0.00091
302	-0.03423	-34.2344	0.105566	105.566	0.040364	40.36405	0.047426	-0.00085
303	-0.03197	-31.9743	0.103899	103.899	0.041111	41.1109	0.04822	-0.00078
304	-0.02968	-29.6752	0.102203	102.2025	0.041819	41.8192	0.048959	-0.00072
305	-0.02734	-27.3393	0.100479	100.4786	0.04249	42.48964	0.049643	-0.00066
306	-0.02497	-24.9686	0.098729	98.72896	0.043123	43.1231	0.050271	-0.00059
307	-0.02256	-22.565	0.096956	96.95567	0.043721	43.72066	0.050841	-0.00053
308	-0.02013	-20.1305	0.095161	95.16062	0.044284	44.28361	0.051353	-0.00046

309	-0.01767	-17.6668	0.093346	93.34572	0.044814	44.8135	0.051806	-0.0004
310	-0.01518	-15.1757	0.091513	91.51288	0.045312	45.31209	0.0522	-0.00033
311	-0.01266	-12.6588	0.089664	89.66399	0.045781	45.78142	0.052534	-0.00026
312	-0.01012	-10.1176	0.087801	87.80091	0.046224	46.22377	0.052807	-0.0002
313	-0.00755	-7.55346	0.085925	85.92547	0.046642	46.64176	0.053019	-0.00013
314	-0.00497	-4.96748	0.084039	84.03945	0.047038	47.03827	0.05317	-6E-05
315	-0.00236	-2.36071	0.082145	82.14459	0.047417	47.41655	0.053257	8.11E-06
316	0.000266	0.26564	0.080243	80.24264	0.047773	47.7726	0.053283	7.64E-05
317	0.002907	2.907334	0.078336	78.33586	0.048052	48.05178	0.053245	0.000145
318	0.00556	5.56015	0.076427	76.42698	0.048254	48.25406	0.053143	0.000213
319	0.00822	8.219865	0.074519	74.51873	0.04838	48.37956	0.052978	0.000281
320	0.010882	10.88227	0.072614	72.61384	0.048428	48.42845	0.052749	0.000349
321	0.013543	13.54316	0.070715	70.71503	0.048401	48.40104	0.052456	0.000416
322	0.016198	16.19838	0.068825	68.82499	0.048298	48.29772	0.052099	0.000483
323	0.018844	18.84377	0.066946	66.94639	0.048119	48.11898	0.051679	0.000549
324	0.021475	21.47522	0.065082	65.0819	0.047865	47.86542	0.051195	0.000615
325	0.024089	24.08865	0.063234	63.23414	0.047538	47.53771	0.050648	0.00068
326	0.02668	26.68004	0.061406	61.40571	0.047137	47.13665	0.050039	0.000745
327	0.029245	29.24539	0.059599	59.59918	0.046663	46.66312	0.049369	0.000808
328	0.031781	31.78078	0.057817	57.81706	0.046118	46.11809	0.048637	0.000871
329	0.000914	0.914159	0.056062	56.06185	0.067403	67.40279	0.047573	0.000932
330	0.036746	36.74624	0.054336	54.33598	0.044818	44.8179	0.046462	0.000993
331	0.039169	39.16876	0.052642	52.64185	0.044065	44.06514	0.045551	0.001051
332	0.041546	41.54624	0.050982	50.98179	0.043246	43.24569	0.044583	0.001109
333	0.043875	43.87508	0.049358	49.35809	0.042361	42.36098	0.043558	0.001166
334	0.046152	46.15177	0.047773	47.77296	0.041413	41.4125	0.042478	0.001221
335	0.048373	48.3729	0.046229	46.22859	0.040402	40.40185	0.041345	0.001274
336	0.050535	50.53515	0.044727	44.72705	0.039331	39.33069	0.040158	0.001326
337	0.052635	52.63527	0.04327	43.27039	0.038201	38.20077	0.038921	0.001377
338	0.05467	54.67015	0.041861	41.86055	0.037014	37.01391	0.037634	0.001426
339	0.056637	56.63675	0.040499	40.49942	0.035772	35.77199	0.036298	0.001473
340	0.058532	58.53216	0.039189	39.18879	0.034477	34.47698	0.034917	0.001519
341	0.060354	60.35356	0.03793	37.93039	0.033131	33.13091	0.033491	0.001562
342	0.062098	62.09827	0.036726	36.72587	0.031736	31.73587	0.032022	0.001604
343	0.063764	63.76372	0.035577	35.57676	0.030294	30.29401	0.030512	0.001644
344	0.065347	65.34744	0.034485	34.48453	0.028808	28.80755	0.028964	0.001682
345	0.066847	66.84712	0.033451	33.45055	0.027279	27.27876	0.027378	0.001718
346	0.068261	68.26055	0.032476	32.47609	0.02571	25.70995	0.025758	0.001752
347	0.069586	69.58566	0.031562	31.56233	0.024103	24.10349	0.024104	0.001784
348	0.070821	70.82052	0.03071	30.71034	0.022462	22.4618	0.02242	0.001813
349	0.071963	71.96332	0.029921	29.92111	0.020787	20.78732	0.020707	0.001841
350	0.073012	73.01241	0.029195	29.19549	0.019083	19.08257	0.018968	0.001866
351	0.073966	73.96624	0.028534	28.53426	0.01735	17.35006	0.017205	0.001889
352	0.074823	74.82345	0.027938	27.93807	0.015592	15.59236	0.015421	0.00191
353	0.075583	75.58278	0.027407	27.40745	0.013812	13.81205	0.013617	0.001928
354	0.076243	76.24314	0.026943	26.94285	0.012012	12.01175	0.011795	0.001944

355	0.076804	76.80357	0.026545	26.54457	0.010194	10.19409	0.00996	0.001958
356	0.077263	77.26326	0.026213	26.21282	0.008362	8.361715	0.008112	0.001969
357	0.077622	77.62156	0.025948	25.94767	0.006517	6.517297	0.006254	0.001978
358	0.077878	77.87794	0.025749	25.74909	0.004664	4.663502	0.004389	0.001985
359	0.077778	77.77824	0.025617	25.6169	0.052651	52.65125	0.001902	0.001989
360	0.078084	78.08363	0.025551	25.55053	0.000924	0.923972	-0.00056	0.00199

Случай 2: обделка тоннеля со стыками

$u_1$  – перемещение обделки в направлении радиуса, м

$u_2$  – перемещение обделки в тангенциальном направлении, м

$M$  – Изгибающий момент, кНм

$T$  – Продольная сила, кН

1. Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей и коэффициент жесткости при вращении стыки  $\lambda = 1.5$ .

Угол, градус	$M$ , Нм	$M$ , кНм	$T$ , Н	$T$ , кН	$V$ , Н	$V$ , кН	$u_1$ , м	$u_2$ , м
0	0.256846	256.8459	0.066514	66.51439	0.003361	3.360667	0.003326	0.006647
1	0.256685	256.6846	0.066514	66.51439	-0.00336	-3.36067	-0.00205	0.006647
2	0.256192	256.1919	0.066759	66.75854	-0.01026	-10.2644	-0.00742	0.00664
3	0.255368	255.3685	0.067246	67.24556	-0.01715	-17.1537	-0.01278	0.006627
4	0.254216	254.2155	0.067976	67.97597	-0.02402	-24.0192	-0.01812	0.006607
5	0.252735	252.7347	0.06895	68.94986	-0.03085	-30.8512	-0.02343	0.006581
6	0.250928	250.9279	0.070167	70.16695	-0.03764	-37.6402	-0.0287	0.006548
7	0.248798	248.7978	0.071627	71.62656	-0.04438	-44.3768	-0.03394	0.006509
8	0.246347	246.3473	0.073328	73.32763	-0.05105	-51.0516	-0.03912	0.006464
9	0.24358	243.5799	0.075269	75.2687	-0.05766	-57.6552	-0.04425	0.006412
10	0.240499	240.4993	0.077448	77.44793	-0.06418	-64.1782	-0.04932	0.006354
11	0.23711	237.1099	0.079863	79.86314	-0.07061	-70.6116	-0.05432	0.00629
12	0.233416	233.4164	0.082512	82.51173	-0.07695	-76.9461	-0.05925	0.00622
13	0.229424	229.4241	0.085391	85.39077	-0.08317	-83.1729	-0.0641	0.006144
14	0.225138	225.1385	0.088497	88.49696	-0.08928	-89.2831	-0.06886	0.006062
15	0.220566	220.5656	0.091827	91.82665	-0.09527	-95.268	-0.07353	0.005974
16	0.215712	215.7118	0.095376	95.37585	-0.10112	-101.119	-0.0781	0.005881
17	0.210584	210.5841	0.09914	99.14022	-0.10683	-106.828	-0.08256	0.005782
18	0.205189	205.1895	0.103115	103.1151	-0.11239	-112.386	-0.08691	0.005677
19	0.199536	199.5357	0.107296	107.2955	-0.11779	-117.785	-0.09115	0.005567
20	0.193631	193.6308	0.111676	111.6762	-0.12302	-123.019	-0.09527	0.005452
21	0.187483	187.483	0.116251	116.2514	-0.12808	-128.078	-0.09926	0.005332
22	0.181101	181.1011	0.121015	121.0154	-0.13296	-132.956	-0.10312	0.005207
23	0.174494	174.4941	0.125962	125.9619	-0.13764	-137.645	-0.10685	0.005078
24	0.167671	167.6714	0.131084	131.0845	-0.14214	-142.138	-0.11043	0.004943
25	0.160643	160.6427	0.136376	136.3763	-0.14643	-146.429	-0.11387	0.004805
26	0.153418	153.4181	0.141831	141.8306	-0.15051	-150.512	-0.11716	0.004662
27	0.146008	146.0078	0.14744	147.4398	-0.15438	-154.379	-0.12029	0.004514
28	0.138423	138.4225	0.153197	153.1967	-0.15803	-158.026	-0.12327	0.004363
29	0.133356	133.3555	0.159093	159.0935	-0.07762	-77.6183	-0.1649	0.004209

30	0.122771	122.7705	0.165122	165.1222	-0.16463	-164.634	-0.20557	0.003986
31	0.114726	114.7263	0.171275	171.2748	-0.16759	-167.586	-0.20806	0.00376
32	0.106552	106.5521	0.177543	177.5431	-0.1703	-170.296	-0.21037	0.003531
33	0.09826	98.25955	0.183919	183.9187	-0.17276	-172.759	-0.21252	0.003298
34	0.089861	89.86078	0.190393	190.393	-0.17497	-174.973	-0.21449	0.003064
35	0.081368	81.36796	0.196957	196.9573	-0.17693	-176.932	-0.21628	0.002826
36	0.072793	72.79344	0.203603	203.6027	-0.17863	-178.634	-0.2179	0.002587
37	0.06415	64.14974	0.21032	210.3202	-0.18008	-180.076	-0.21933	0.002345
38	0.05545	55.44951	0.217101	217.1007	-0.18125	-181.253	-0.22058	0.002101
39	0.046706	46.70551	0.223935	223.935	-0.18217	-182.165	-0.22165	0.001856
40	0.037931	37.9306	0.230814	230.8135	-0.18281	-182.809	-0.22254	0.00161
41	0.029138	29.13776	0.237727	237.7271	-0.18318	-183.183	-0.22324	0.001362
42	0.02034	20.34	0.244666	244.666	-0.18329	-183.285	-0.22376	0.001114
43	0.01155	11.55039	0.251621	251.6209	-0.18312	-183.115	-0.22409	0.000864
44	0.002782	2.782062	0.258582	258.5821	-0.18267	-182.672	-0.22424	0.000615
45	-0.00595	-5.95186	0.26554	265.5399	-0.18196	-181.955	-0.22421	0.000365
46	-0.01464	-14.6382	0.272485	272.4847	-0.18096	-180.965	-0.22399	0.000115
47	-0.02326	-23.264	0.279407	279.4069	-0.1797	-179.701	-0.2236	-0.00013
48	-0.03182	-31.8211	0.286298	286.2977	-0.17827	-178.272	-0.22302	-0.00038
49	-0.04031	-40.3055	0.29315	293.1501	-0.17676	-176.757	-0.22227	-0.00063
50	-0.04871	-48.7125	0.299958	299.9577	-0.17514	-175.144	-0.22133	-0.00088
51	-0.05704	-57.0368	0.306714	306.7138	-0.17342	-173.422	-0.22023	-0.00113
52	-0.06527	-65.2727	0.313412	313.4116	-0.17158	-171.58	-0.21894	-0.00137
53	-0.07341	-73.4141	0.320044	320.0443	-0.16961	-169.611	-0.21749	-0.00161
54	-0.08145	-81.4545	0.326605	326.6047	-0.16751	-167.506	-0.21587	-0.00186
55	-0.08939	-89.3871	0.333086	333.0859	-0.16526	-165.261	-0.21408	-0.0021
56	-0.0972	-97.2049	0.339481	339.4808	-0.16287	-162.87	-0.21213	-0.00233
57	-0.1049	-104.901	0.345782	345.7822	-0.16033	-160.33	-0.21001	-0.00257
58	-0.11247	-112.467	0.351983	351.983	-0.15764	-157.637	-0.20773	-0.0028
59	-0.1199	-119.897	0.358076	358.0763	-0.15479	-154.789	-0.2053	-0.00303
60	-0.12718	-127.183	0.364055	364.0551	-0.15179	-151.785	-0.20271	-0.00326
61	-0.13432	-134.317	0.369912	369.9123	-0.14862	-148.625	-0.19997	-0.00348
62	-0.14129	-141.292	0.375641	375.6412	-0.14531	-145.308	-0.19709	-0.0037
63	-0.1481	-148.1	0.381235	381.235	-0.14183	-141.834	-0.19406	-0.00392
64	-0.15473	-154.734	0.386687	386.6873	-0.13821	-138.205	-0.19088	-0.00413
65	-0.16119	-161.186	0.391992	391.9915	-0.13442	-134.423	-0.18758	-0.00434
66	-0.16745	-167.45	0.397141	397.1414	-0.13049	-130.491	-0.18413	-0.00454
67	-0.17352	-173.518	0.402131	402.131	-0.12641	-126.409	-0.18056	-0.00474
68	-0.17938	-179.383	0.406954	406.9543	-0.12218	-122.183	-0.17687	-0.00494
69	-0.18504	-185.038	0.411606	411.6056	-0.11782	-117.815	-0.17305	-0.00513
70	-0.19048	-190.477	0.416079	416.0795	-0.11331	-113.31	-0.16912	-0.00531
71	-0.19569	-195.693	0.420371	420.3708	-0.10867	-108.672	-0.16507	-0.00549
72	-0.20068	-200.68	0.424474	424.4744	-0.10391	-103.906	-0.16092	-0.00567
73	-0.20543	-205.433	0.428386	428.3858	-0.09902	-99.0163	-0.15667	-0.00584
74	-0.20995	-209.946	0.4321	432.1003	-0.09401	-94.0093	-0.15232	-0.006
75	-0.21421	-214.213	0.435614	435.614	-0.08889	-88.8904	-0.14788	-0.00616

76	-0.21823	-218.229	0.438923	438.9229	-0.08367	-83.6656	-0.14335	-0.00632
77	-0.22199	-221.989	0.442023	442.0234	-0.07834	-78.3412	-0.13874	-0.00646
78	-0.22549	-225.489	0.444912	444.9124	-0.07292	-72.9237	-0.13405	-0.00661
79	-0.22873	-228.725	0.447587	447.5869	-0.06742	-67.4198	-0.12929	-0.00674
80	-0.23169	-231.694	0.450044	450.0444	-0.06184	-61.8366	-0.12447	-0.00687
81	-0.23439	-234.39	0.452283	452.2827	-0.05618	-56.181	-0.11959	-0.007
82	-0.23681	-236.812	0.4543	454.2999	-0.05046	-50.4604	-0.11466	-0.00711
83	-0.23896	-238.957	0.456095	456.0945	-0.04468	-44.6822	-0.10967	-0.00723
84	-0.24082	-240.822	0.457665	457.6655	-0.03885	-38.854	-0.10465	-0.00733
85	-0.24241	-242.405	0.459012	459.012	-0.03298	-32.9835	-0.09959	-0.00743
86	-0.24371	-243.705	0.460134	460.1339	-0.02708	-27.0784	-0.0945	-0.00752
87	-0.24472	-244.72	0.461031	461.0312	-0.02115	-21.1467	-0.08938	-0.00761
88	-0.24545	-245.45	0.461705	461.7045	-0.0152	-15.1961	-0.08425	-0.00768
89	-0.25094	-250.941	0.462155	462.1547	-0.16698	-166.977	-0.00608	-0.00776
90	-0.24605	-246.05	0.462383	462.3832	-0.00327	-3.27068	0.07061	-0.0077
91	-0.24592	-245.92	0.462391	462.3915	0.002707	2.706786	0.075762	-0.00764
92	-0.2455	-245.503	0.462179	462.1787	0.00869	8.689565	0.080909	-0.00757
93	-0.2448	-244.799	0.461743	461.7432	0.01467	14.66964	0.086044	-0.00749
94	-0.24381	-243.808	0.461084	461.0836	0.020639	20.63899	0.091161	-0.00741
95	-0.24253	-242.532	0.460199	460.1989	0.02659	26.58965	0.096254	-0.00732
96	-0.24097	-240.971	0.459089	459.0888	0.032514	32.51367	0.101318	-0.00722
97	-0.23913	-239.128	0.457753	457.7532	0.038403	38.4032	0.106346	-0.00712
98	-0.237	-237.004	0.456192	456.1924	0.04425	44.25044	0.111332	-0.00701
99	-0.2346	-234.601	0.454407	454.4071	0.050048	50.04771	0.116271	-0.0069
100	-0.23192	-231.924	0.452399	452.3986	0.055787	55.78741	0.121157	-0.00678
101	-0.22897	-228.973	0.450168	450.1683	0.061462	61.46211	0.125984	-0.00665
102	-0.22575	-225.754	0.447718	447.7181	0.067065	67.06452	0.130746	-0.00652
103	-0.22227	-222.27	0.44505	445.0502	0.072587	72.5875	0.135439	-0.00638
104	-0.21852	-218.525	0.442167	442.1673	0.078024	78.0241	0.140055	-0.00623
105	-0.21452	-214.523	0.439072	439.0723	0.083368	83.3676	0.14459	-0.00608
106	-0.21027	-210.27	0.435768	435.7683	0.088611	88.61145	0.149039	-0.00592
107	-0.20577	-205.77	0.432259	432.2591	0.093749	93.74939	0.153396	-0.00576
108	-0.20103	-201.029	0.428548	428.5484	0.098775	98.77538	0.157657	-0.00559
109	-0.19605	-196.052	0.42464	424.6404	0.103684	103.6837	0.161815	-0.00542
110	-0.19085	-190.845	0.42054	420.5397	0.108469	108.4688	0.165867	-0.00524
111	-0.18542	-185.415	0.416251	416.2508	0.113126	113.1257	0.169808	-0.00506
112	-0.17977	-179.768	0.411779	411.7789	0.117649	117.6494	0.173632	-0.00487
113	-0.17391	-173.91	0.407129	407.1291	0.122036	122.0357	0.177336	-0.00468
114	-0.16785	-167.849	0.402307	402.3069	0.12628	126.2803	0.180915	-0.00448
115	-0.16159	-161.59	0.397318	397.318	0.13038	130.3797	0.184366	-0.00428
116	-0.15514	-155.142	0.392168	392.1683	0.134331	134.3306	0.187683	-0.00408
117	-0.14851	-148.512	0.386864	386.8639	0.13813	138.1303	0.190863	-0.00387
118	-0.14171	-141.707	0.381411	381.4111	0.141776	141.7764	0.193902	-0.00366
119	-0.13473	-134.734	0.375816	375.8164	0.145267	145.2672	0.196797	-0.00344
120	-0.1276	-127.601	0.370086	370.0862	0.148601	148.6015	0.199545	-0.00322
121	-0.12032	-120.315	0.364227	364.2274	0.151779	151.7786	0.202141	-0.00299

122	-0.11289	-112.885	0.358247	358.2467	0.154798	154.7984	0.204583	-0.00277
123	-0.10532	-105.317	0.352151	352.1511	0.157662	157.6616	0.206869	-0.00254
124	-0.09762	-97.6195	0.345948	345.9476	0.16037	160.3696	0.208994	-0.00231
125	-0.0898	-89.799	0.339643	339.6433	0.162924	162.9245	0.210957	-0.00207
126	-0.08186	-81.8632	0.333245	333.2453	0.165329	165.329	0.212755	-0.00184
127	-0.07382	-73.8189	0.326761	326.7607	0.167587	167.5872	0.214385	-0.0016
128	-0.06567	-65.6731	0.320197	320.1965	0.169704	169.7036	0.215846	-0.00136
129	-0.05743	-57.4322	0.31356	313.56	0.171684	171.6841	0.217135	-0.00111
130	-0.0491	-49.1024	0.306858	306.8581	0.173536	173.5356	0.218251	-0.00087
131	-0.04069	-40.6895	0.300098	300.0977	0.175266	175.2662	0.219191	-0.00063
132	-0.0322	-32.1989	0.293286	293.2857	0.176886	176.8856	0.219955	-0.00038
133	-0.02364	-23.6354	0.286429	286.4287	0.178405	178.4048	0.220539	-0.00014
134	-0.015	-15.0032	0.279533	279.5333	0.179837	179.8366	0.220944	0.000112
135	-0.00631	-6.31019	0.272606	272.6064	0.181103	181.1031	0.221167	0.000359
136	0.00243	2.430496	0.265657	265.6569	0.182096	182.0962	0.221208	0.000606
137	0.011206	11.20571	0.258694	258.6943	0.182816	182.8155	0.221065	0.000852
138	0.020002	20.00232	0.251728	251.7283	0.183261	183.2612	0.220738	0.001099
139	0.028807	28.80721	0.244769	244.7686	0.183434	183.4335	0.220227	0.001344
140	0.037607	37.60728	0.237825	237.8247	0.183333	183.3333	0.219531	0.001589
141	0.04639	46.38952	0.230906	230.9063	0.182962	182.9617	0.218652	0.001832
142	0.055141	55.14095	0.224023	224.0227	0.18232	182.3201	0.217588	0.002075
143	0.063849	63.84872	0.217183	217.1835	0.18141	181.4102	0.216342	0.002315
144	0.0725	72.50004	0.210398	210.3979	0.180234	180.2343	0.214914	0.002554
145	0.081082	81.08226	0.203675	203.6754	0.178795	178.7948	0.213306	0.002791
146	0.089583	89.58288	0.197025	197.0249	0.177095	177.0946	0.211519	0.003026
147	0.09799	97.98951	0.190456	190.4555	0.175137	175.1368	0.209554	0.003258
148	0.10629	106.29	0.183976	183.9762	0.172925	172.9248	0.207415	0.003487
149	0.116822	116.8222	0.177596	177.5955	0.243897	243.8975	0.171106	0.003713
150	0.122525	122.5245	0.171322	171.3222	0.167754	167.7541	0.135322	0.00388
151	0.130435	130.4352	0.165165	165.1646	0.164804	164.8039	0.132673	0.004044
152	0.138193	138.1928	0.159131	159.1312	0.161617	161.6168	0.12986	0.004204
153	0.145786	145.7864	0.15323	153.2299	0.158198	158.1977	0.126886	0.00436
154	0.153205	153.2049	0.147469	147.4688	0.154552	154.552	0.123754	0.004513
155	0.160438	160.4379	0.141856	141.8556	0.150685	150.6854	0.12047	0.004662
156	0.167475	167.4749	0.136398	136.3977	0.146604	146.6037	0.117035	0.004806
157	0.174306	174.306	0.131102	131.1024	0.142313	142.3133	0.113456	0.004946
158	0.180921	180.9215	0.125977	125.9768	0.13782	137.8204	0.109736	0.005081
159	0.187312	187.3119	0.121027	121.0274	0.133132	133.1319	0.105879	0.005212
160	0.193468	193.4681	0.116261	116.2609	0.128255	128.2547	0.101891	0.005337
161	0.199382	199.3816	0.111683	111.6834	0.123196	123.196	0.097777	0.005458
162	0.205044	205.0439	0.107301	107.3008	0.117963	117.9632	0.093542	0.005574
163	0.210447	210.447	0.103119	103.1187	0.112564	112.564	0.08919	0.005684
164	0.215583	215.5833	0.099142	99.14239	0.107006	107.0062	0.084728	0.005789
165	0.220446	220.4457	0.095377	95.37693	0.101298	101.2978	0.080162	0.005888
166	0.225027	225.0272	0.091827	91.82695	0.095447	95.4471	0.075497	0.005982
167	0.229321	229.3214	0.088497	88.49677	0.089462	89.46248	0.070738	0.00607

168	0.233322	233.3224	0.08539	85.39041	0.083353	83.35252	0.065893	0.006152
169	0.237024	237.0244	0.082512	82.51152	0.077126	77.12592	0.060967	0.006228
170	0.240422	240.4225	0.079863	79.86338	0.070792	70.79154	0.055967	0.006298
171	0.243512	243.5117	0.077449	77.44895	0.064358	64.35837	0.050899	0.006362
172	0.246288	246.2878	0.075271	75.27081	0.057836	57.8355	0.045769	0.006419
173	0.248747	248.747	0.073331	73.33115	0.051232	51.23214	0.040585	0.006471
174	0.250886	250.8858	0.071632	71.63182	0.044558	44.55758	0.035352	0.006516
175	0.252701	252.7012	0.070174	70.17427	0.037821	37.82117	0.030078	0.006555
176	0.254191	254.1908	0.06896	68.95956	0.031032	31.03236	0.024769	0.006587
177	0.255352	255.3524	0.067988	67.98837	0.024201	24.20062	0.019433	0.006613
178	0.256185	256.1845	0.067261	67.26098	0.017335	17.33548	0.014076	0.006632
179	0.256686	256.6859	0.066777	66.77729	0.010446	10.44646	0.008704	0.006645
180	0.256856	256.856	0.066537	66.53679	0.003543	3.543139	0.003326	0.006651
181	0.256695	256.6945	0.066539	66.53855	-0.00336	-3.36495	-0.00205	0.006651
182	0.256202	256.2016	0.066782	66.78229	-0.01027	-10.2682	-0.00742	0.006644
183	0.255378	255.3781	0.067269	67.26887	-0.01716	-17.1572	-0.01278	0.006631
184	0.254225	254.225	0.067999	67.9988	-0.02402	-24.0223	-0.01812	0.006611
185	0.252744	252.744	0.068972	68.97221	-0.03085	-30.854	-0.02343	0.006585
186	0.250937	250.9371	0.070189	70.18879	-0.03764	-37.6428	-0.0287	0.006552
187	0.248807	248.8069	0.071648	71.64788	-0.04438	-44.3791	-0.03394	0.006513
188	0.246356	246.3563	0.073348	73.34841	-0.05105	-51.0537	-0.03912	0.006468
189	0.243589	243.5887	0.075289	75.28892	-0.05766	-57.657	-0.04425	0.006416
190	0.240508	240.5081	0.077468	77.4676	-0.06418	-64.1799	-0.04932	0.006358
191	0.237119	237.1186	0.079882	79.88223	-0.07061	-70.6131	-0.05433	0.006294
192	0.233425	233.4251	0.08253	82.53025	-0.07695	-76.9476	-0.05925	0.006224
193	0.229433	229.4327	0.085409	85.40871	-0.08317	-83.1743	-0.0641	0.006148
194	0.225147	225.147	0.088514	88.51431	-0.08928	-89.2845	-0.06886	0.006066
195	0.220574	220.574	0.091843	91.84342	-0.09527	-95.2693	-0.07353	0.005978
196	0.21572	215.7202	0.095392	95.39204	-0.10112	-101.12	-0.0781	0.005885
197	0.210592	210.5924	0.099156	99.15583	-0.10683	-106.829	-0.08256	0.005786
198	0.205198	205.1978	0.10313	103.1301	-0.11239	-112.387	-0.08692	0.005681
199	0.199544	199.5439	0.10731	107.31	-0.11779	-117.787	-0.09116	0.005571
200	0.193639	193.6389	0.11169	111.69	-0.12302	-123.02	-0.09527	0.005456
201	0.187491	187.491	0.116265	116.2648	-0.12808	-128.08	-0.09927	0.005336
202	0.181109	181.109	0.121028	121.0282	-0.13296	-132.957	-0.10313	0.005211
203	0.174502	174.5019	0.125974	125.9742	-0.13765	-137.647	-0.10685	0.005081
204	0.167679	167.6791	0.131096	131.0962	-0.14214	-142.14	-0.11043	0.004947
205	0.16065	160.6503	0.136388	136.3876	-0.14643	-146.432	-0.11387	0.004808
206	0.153426	153.4256	0.141841	141.8413	-0.15051	-150.515	-0.11716	0.004665
207	0.146015	146.0152	0.14745	147.4501	-0.15438	-154.382	-0.1203	0.004518
208	0.13843	138.4297	0.153207	153.2065	-0.15803	-158.029	-0.12328	0.004367
209	0.133363	133.3627	0.159103	159.1028	-0.07762	-77.6174	-0.16491	0.004212
210	0.122777	122.7773	0.165131	165.1311	-0.16464	-164.638	-0.20558	0.003989
211	0.114733	114.7329	0.171283	171.2833	-0.16759	-167.59	-0.20806	0.003763
212	0.106558	106.5584	0.177551	177.5512	-0.1703	-170.3	-0.21038	0.003534
213	0.098266	98.26567	0.183926	183.9264	-0.17276	-172.764	-0.21253	0.003302

214	0.089867	89.86664	0.1904	190.4004	-0.17498	-174.978	-0.2145	0.003067
215	0.081374	81.37353	0.196964	196.9644	-0.17694	-176.938	-0.21629	0.00283
216	0.072799	72.79871	0.203609	203.6095	-0.17864	-178.641	-0.21791	0.00259
217	0.064155	64.15468	0.210327	210.3267	-0.18008	-180.082	-0.21934	0.002348
218	0.055454	55.4541	0.217107	217.107	-0.18126	-181.261	-0.22059	0.002105
219	0.04671	46.70973	0.223941	223.9409	-0.18217	-182.173	-0.22166	0.001859
220	0.037934	37.93443	0.230819	230.8193	-0.18282	-182.817	-0.22255	0.001613
221	0.029141	29.14117	0.237733	237.7327	-0.18319	-183.191	-0.22325	0.001365
222	0.020343	20.34297	0.244671	244.6715	-0.18329	-183.294	-0.22377	0.001117
223	0.011553	11.5529	0.251626	251.6262	-0.18312	-183.125	-0.2241	0.000867
224	0.002784	2.784086	0.258587	258.5872	-0.18268	-182.682	-0.22425	0.000618
225	-0.00595	-5.95035	0.265545	265.5449	-0.18197	-181.966	-0.22422	0.000368
226	-0.01464	-14.6373	0.27249	272.4897	-0.18098	-180.976	-0.22401	0.000118
227	-0.02326	-23.2635	0.279412	279.4118	-0.17971	-179.713	-0.22361	-0.00013
228	-0.03182	-31.8211	0.286303	286.3026	-0.17828	-178.282	-0.22303	-0.00038
229	-0.04031	-40.3059	0.293155	293.155	-0.17677	-176.766	-0.22228	-0.00063
230	-0.04871	-48.7133	0.299963	299.9625	-0.17515	-175.151	-0.22134	-0.00088
231	-0.05704	-57.0379	0.306719	306.7186	-0.17343	-173.428	-0.22024	-0.00112
232	-0.06527	-65.274	0.313416	313.4163	-0.17159	-171.585	-0.21896	-0.00137
233	-0.07342	-73.4156	0.320049	320.0488	-0.16961	-169.615	-0.2175	-0.00161
234	-0.08146	-81.4561	0.326609	326.6092	-0.16751	-167.509	-0.21588	-0.00185
235	-0.08939	-89.3888	0.33309	333.0903	-0.16526	-165.263	-0.21409	-0.00209
236	-0.09721	-97.2067	0.339485	339.4851	-0.16287	-162.872	-0.21214	-0.00233
237	-0.1049	-104.903	0.345786	345.7864	-0.16033	-160.331	-0.21002	-0.00257
238	-0.11247	-112.469	0.351987	351.9872	-0.15764	-157.638	-0.20774	-0.0028
239	-0.1199	-119.899	0.35808	358.0804	-0.15479	-154.789	-0.20531	-0.00303
240	-0.12719	-127.185	0.364059	364.0591	-0.15179	-151.785	-0.20272	-0.00325
241	-0.13432	-134.319	0.369916	369.9162	-0.14862	-148.625	-0.19998	-0.00348
242	-0.14129	-141.294	0.375645	375.645	-0.14531	-145.307	-0.1971	-0.0037
243	-0.1481	-148.102	0.381239	381.2389	-0.14183	-141.833	-0.19407	-0.00391
244	-0.15474	-154.736	0.386691	386.6911	-0.1382	-138.204	-0.1909	-0.00413
245	-0.16119	-161.188	0.391995	391.9952	-0.13442	-134.422	-0.18759	-0.00433
246	-0.16745	-167.452	0.397145	397.1451	-0.13049	-130.489	-0.18414	-0.00454
247	-0.17352	-173.519	0.402135	402.1346	-0.12641	-126.408	-0.18057	-0.00474
248	-0.17938	-179.384	0.406958	406.9578	-0.12218	-122.182	-0.17688	-0.00493
249	-0.18504	-185.039	0.411609	411.6091	-0.11781	-117.814	-0.17306	-0.00512
250	-0.19048	-190.478	0.416083	416.083	-0.11331	-113.309	-0.16913	-0.00531
251	-0.19569	-195.694	0.420374	420.3742	-0.10867	-108.67	-0.16508	-0.00549
252	-0.20068	-200.682	0.424478	424.4778	-0.1039	-103.904	-0.16093	-0.00567
253	-0.20543	-205.434	0.428389	428.3891	-0.09901	-99.0147	-0.15668	-0.00584
254	-0.20995	-209.947	0.432104	432.1036	-0.09401	-94.0077	-0.15233	-0.006
255	-0.21421	-214.214	0.435617	435.6172	-0.08889	-88.8888	-0.14789	-0.00616
256	-0.21823	-218.229	0.438926	438.926	-0.08366	-83.664	-0.14336	-0.00632
257	-0.22199	-221.99	0.442026	442.0265	-0.07834	-78.3396	-0.13875	-0.00646
258	-0.22549	-225.49	0.444915	444.9154	-0.07292	-72.9222	-0.13406	-0.00661
259	-0.22873	-228.726	0.44759	447.5898	-0.06742	-67.4183	-0.1293	-0.00674

260	-0.23169	-231.694	0.450047	450.0472	-0.06184	-61.8351	-0.12448	-0.00687
261	-0.23439	-234.391	0.452285	452.2853	-0.05618	-56.1795	-0.1196	-0.007
262	-0.23681	-236.813	0.454302	454.3024	-0.05046	-50.4589	-0.11467	-0.00711
263	-0.23896	-238.958	0.456097	456.0968	-0.04468	-44.6808	-0.10968	-0.00722
264	-0.24082	-240.823	0.457668	457.6676	-0.03885	-38.8526	-0.10466	-0.00733
265	-0.24241	-242.406	0.459014	459.0139	-0.03298	-32.9821	-0.0996	-0.00743
266	-0.24371	-243.705	0.460136	460.1356	-0.02708	-27.077	-0.09451	-0.00752
267	-0.24472	-244.72	0.461033	461.0326	-0.02115	-21.1453	-0.08939	-0.0076
268	-0.24545	-245.45	0.461706	461.7055	-0.01519	-15.1947	-0.08426	-0.00768
269	-0.25094	-250.941	0.462155	462.1554	-0.16698	-166.976	-0.00609	-0.00776
270	-0.24605	-246.05	0.462383	462.3835	-0.00327	-3.26928	0.0706	-0.0077
271	-0.24592	-245.92	0.462391	462.3913	0.002708	2.70819	0.075752	-0.00764
272	-0.2455	-245.503	0.462178	462.1782	0.008691	8.69097	0.080899	-0.00757
273	-0.2448	-244.799	0.461742	461.7423	0.014671	14.67104	0.086034	-0.00749
274	-0.24381	-243.808	0.461082	461.0824	0.02064	20.6404	0.091151	-0.00741
275	-0.24253	-242.531	0.460197	460.1975	0.026591	26.59107	0.096244	-0.00732
276	-0.24097	-240.971	0.459087	459.0871	0.032515	32.5151	0.101308	-0.00722
277	-0.23913	-239.127	0.457751	457.7512	0.038405	38.40464	0.106336	-0.00712
278	-0.237	-237.003	0.45619	456.1902	0.044252	44.2519	0.111322	-0.00701
279	-0.2346	-234.601	0.454405	454.4048	0.050049	50.04917	0.116262	-0.0069
280	-0.23192	-231.923	0.452396	452.3961	0.055789	55.7889	0.121147	-0.00678
281	-0.22897	-228.973	0.450166	450.1657	0.061464	61.46362	0.125974	-0.00665
282	-0.22575	-225.753	0.447715	447.7154	0.067066	67.06604	0.130737	-0.00652
283	-0.22227	-222.269	0.445047	445.0474	0.072589	72.58903	0.135429	-0.00638
284	-0.21852	-218.524	0.442164	442.1644	0.078026	78.02566	0.140045	-0.00623
285	-0.21452	-214.522	0.439069	439.0693	0.083369	83.36917	0.14458	-0.00608
286	-0.21027	-210.269	0.435765	435.7653	0.088613	88.61303	0.149029	-0.00593
287	-0.20577	-205.769	0.432256	432.256	0.093751	93.75098	0.153386	-0.00576
288	-0.20103	-201.027	0.428545	428.5452	0.098777	98.77697	0.157647	-0.0056
289	-0.19605	-196.05	0.424637	424.6372	0.103685	103.6853	0.161805	-0.00542
290	-0.19084	-190.844	0.420536	420.5364	0.10847	108.4704	0.165857	-0.00525
291	-0.18541	-185.413	0.416247	416.2475	0.113127	113.1272	0.169797	-0.00506
292	-0.17977	-179.766	0.411775	411.7755	0.117651	117.6509	0.173622	-0.00488
293	-0.17391	-173.908	0.407126	407.1256	0.122037	122.0371	0.177326	-0.00468
294	-0.16785	-167.847	0.402303	402.3034	0.126282	126.2817	0.180905	-0.00449
295	-0.16159	-161.588	0.397314	397.3145	0.130381	130.381	0.184355	-0.00428
296	-0.15514	-155.14	0.392165	392.1647	0.134332	134.3318	0.187672	-0.00408
297	-0.14851	-148.51	0.38686	386.8603	0.138131	138.1313	0.190852	-0.00387
298	-0.1417	-141.705	0.381407	381.4075	0.141777	141.7772	0.193892	-0.00366
299	-0.13473	-134.732	0.375813	375.8126	0.145268	145.2678	0.196787	-0.00344
300	-0.1276	-127.599	0.370082	370.0824	0.148602	148.6018	0.199534	-0.00322
301	-0.12031	-120.313	0.364223	364.2235	0.151779	151.7786	0.202131	-0.003
302	-0.11288	-112.883	0.358243	358.2427	0.154798	154.7981	0.204573	-0.00277
303	-0.10532	-105.315	0.352147	352.1471	0.157661	157.6609	0.206858	-0.00254
304	-0.09762	-97.6176	0.345944	345.9435	0.160368	160.3684	0.208983	-0.00231
305	-0.0898	-89.7972	0.339639	339.6391	0.162923	162.9227	0.210946	-0.00208

306	-0.08186	-81.8615	0.333241	333.241	0.165327	165.3267	0.212744	-0.00184
307	-0.07382	-73.8174	0.326756	326.7563	0.167584	167.5841	0.214374	-0.0016
308	-0.06567	-65.6717	0.320192	320.1921	0.1697	169.6997	0.215835	-0.00136
309	-0.05743	-57.431	0.313555	313.5555	0.171679	171.6792	0.217124	-0.00112
310	-0.0491	-49.1015	0.306853	306.8534	0.17353	173.5297	0.21824	-0.00087
311	-0.04069	-40.689	0.300093	300.093	0.175259	175.2591	0.21918	-0.00063
312	-0.0322	-32.1989	0.293281	293.2809	0.176877	176.8772	0.219944	-0.00038
313	-0.02364	-23.6358	0.286424	286.4239	0.178395	178.3948	0.220529	-0.00014
314	-0.015	-15.0042	0.279528	279.5284	0.179825	179.8249	0.220933	0.000109
315	-0.00631	-6.31168	0.272602	272.6015	0.181092	181.0919	0.221156	0.000356
316	0.002429	2.428502	0.265652	265.6519	0.182085	182.0855	0.221197	0.000602
317	0.011203	11.20323	0.258689	258.6893	0.182805	182.8053	0.221054	0.000849
318	0.019999	19.99938	0.251723	251.7232	0.183251	183.2515	0.220728	0.001095
319	0.028804	28.80382	0.244763	244.7633	0.183424	183.4243	0.220216	0.001341
320	0.037603	37.60347	0.237819	237.8193	0.183325	183.3246	0.219521	0.001586
321	0.046385	46.38531	0.230901	230.9006	0.182953	182.9534	0.218641	0.001829
322	0.055136	55.13638	0.224017	224.0168	0.182312	182.3123	0.217578	0.002071
323	0.063844	63.84379	0.217177	217.1774	0.181403	181.4029	0.216332	0.002312
324	0.072495	72.49478	0.210392	210.3916	0.180227	180.2275	0.214904	0.002551
325	0.081077	81.0767	0.203669	203.6687	0.178788	178.7884	0.213296	0.002788
326	0.089577	89.57702	0.197018	197.0179	0.177089	177.0886	0.211509	0.003022
327	0.097983	97.98339	0.190448	190.4482	0.175131	175.1312	0.209544	0.003254
328	0.106284	106.2836	0.183969	183.9685	0.17292	172.9196	0.207405	0.003483
329	0.116815	116.8154	0.177588	177.5875	0.243888	243.8885	0.171098	0.00371
330	0.122518	122.5177	0.171314	171.3138	0.16775	167.7497	0.135317	0.003877
331	0.130428	130.4282	0.165156	165.1558	0.1648	164.7999	0.132668	0.00404
332	0.138186	138.1857	0.159122	159.1219	0.161613	161.6131	0.129855	0.0042
333	0.145779	145.779	0.15322	153.2203	0.158194	158.1943	0.126881	0.004357
334	0.153197	153.1975	0.147459	147.4587	0.154549	154.5489	0.123749	0.004509
335	0.16043	160.4303	0.141845	141.845	0.150683	150.6826	0.120465	0.004658
336	0.167467	167.4672	0.136387	136.3866	0.146601	146.6012	0.117031	0.004802
337	0.174298	174.2982	0.131091	131.0908	0.142311	142.311	0.113452	0.004942
338	0.180914	180.9135	0.125965	125.9646	0.137818	137.8183	0.109731	0.005077
339	0.187304	187.3038	0.121015	121.0148	0.13313	133.13	0.105875	0.005208
340	0.19346	193.46	0.116248	116.2477	0.128253	128.253	0.101887	0.005333
341	0.199373	199.3734	0.111167	111.6696	0.123194	123.1944	0.097773	0.005454
342	0.205036	205.0356	0.107286	107.2864	0.117962	117.9617	0.093538	0.00557
343	0.210439	210.4387	0.103104	103.1038	0.112563	112.5626	0.089187	0.00568
344	0.215575	215.5749	0.099127	99.12692	0.107005	107.0048	0.084725	0.005785
345	0.220437	220.4372	0.095361	95.36088	0.101296	101.2965	0.080159	0.005884
346	0.225019	225.0186	0.09181	91.81031	0.095446	95.4458	0.075494	0.005978
347	0.229313	229.3128	0.08848	88.47956	0.089461	89.46116	0.070736	0.006066
348	0.233314	233.3137	0.085373	85.37261	0.083351	83.35115	0.06589	0.006148
349	0.237016	237.0157	0.082493	82.49313	0.077124	77.12447	0.060965	0.006224
350	0.240414	240.4136	0.079844	79.84442	0.07079	70.78998	0.055965	0.006294
351	0.243503	243.5028	0.077429	77.42942	0.064357	64.35668	0.050897	0.006358

352	0.246279	246.2788	0.075251	75.25072	0.057834	57.83365	0.045767	0.006415
353	0.248738	248.7379	0.073311	73.31051	0.05123	51.23009	0.040583	0.006467
354	0.250877	250.8766	0.071611	71.61064	0.044555	44.5553	0.035351	0.006512
355	0.252692	252.6919	0.070153	70.15256	0.037819	37.81865	0.030077	0.006551
356	0.254181	254.1813	0.068937	68.93734	0.03103	31.02955	0.024768	0.006583
357	0.255343	255.3428	0.067966	67.96566	0.024198	24.1975	0.019432	0.006609
358	0.256175	256.1747	0.067238	67.23781	0.017332	17.33202	0.014075	0.006628
359	0.256676	256.676	0.066754	66.75368	0.010443	10.44264	0.008704	0.006641
360	0.256846	256.8459	0.066514	66.51439	0.003361	3.360667	0.003326	0.006647

2. Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей и коэффициент жесткости при вращении стыки  $\lambda = 1$ .

Угол, градус	M, Нм	M, кНм	T, Н	T, кН	V, Н	V, кН	u <sub>1</sub> , м	u <sub>2</sub> , м
0	0.251188	251.188	0.073311	73.31057	0.003286	3.285978	0.004891	0.007331
1	0.25103	251.0303	0.073311	73.31057	-0.00329	-3.28598	-0.00037	0.007332
2	0.250547	250.5469	0.073551	73.55095	-0.01007	-10.0712	-0.00562	0.007327
3	0.249738	249.7385	0.074029	74.02921	-0.01684	-16.842	-0.01086	0.007315
4	0.248606	248.6062	0.074746	74.74609	-0.02359	-23.5892	-0.01608	0.007296
5	0.247152	247.1516	0.075702	75.70191	-0.0303	-30.3032	-0.02127	0.007271
6	0.245377	245.3768	0.076897	76.8966	-0.03697	-36.9746	-0.02643	0.007239
7	0.243284	243.2843	0.07833	78.32964	-0.04359	-43.594	-0.03155	0.007201
8	0.240877	240.877	0.08	80.00015	-0.05015	-50.152	-0.03662	0.007156
9	0.238158	238.1582	0.081907	81.90683	-0.05664	-56.6394	-0.04164	0.007105
10	0.235132	235.132	0.084048	84.04798	-0.06305	-63.0469	-0.04659	0.007047
11	0.231802	231.8024	0.086422	86.42154	-0.06937	-69.3655	-0.05148	0.006983
12	0.228174	228.1742	0.089025	89.02504	-0.07559	-75.586	-0.0563	0.006913
13	0.224253	224.2526	0.091856	91.85567	-0.0817	-81.6995	-0.06104	0.006837
14	0.220043	220.0431	0.09491	94.91022	-0.0877	-87.6973	-0.06569	0.006755
15	0.215552	215.5517	0.098185	98.18515	-0.09357	-93.5707	-0.07025	0.006667
16	0.210785	210.7847	0.101677	101.6765	-0.09931	-99.3112	-0.07472	0.006573
17	0.205749	205.749	0.10538	105.3802	-0.10491	-104.91	-0.07908	0.006474
18	0.200452	200.4516	0.109291	109.2914	-0.11036	-110.36	-0.08333	0.006369
19	0.1949	194.9002	0.113405	113.4054	-0.11565	-115.653	-0.08747	0.006258
20	0.189103	189.1028	0.117717	117.7169	-0.12078	-120.78	-0.0915	0.006142
21	0.183067	183.0675	0.12222	122.2203	-0.12573	-125.734	-0.09539	0.006021
22	0.176803	176.803	0.12691	126.9098	-0.13051	-130.508	-0.09916	0.005895
23	0.170318	170.3184	0.131779	131.7793	-0.1351	-135.095	-0.1028	0.005764
24	0.163623	163.6229	0.136822	136.8223	-0.13949	-139.488	-0.1063	0.005628
25	0.156726	156.7262	0.142032	142.0323	-0.14368	-143.68	-0.10965	0.005488
26	0.149638	149.6383	0.147402	147.4021	-0.14766	-147.664	-0.11286	0.005343
27	0.142369	142.3693	0.152925	152.9247	-0.15144	-151.435	-0.11592	0.005194
28	0.13493	134.9299	0.158592	158.5925	-0.15499	-154.987	-0.11882	0.005041
29	0.12994	129.9396	0.164398	164.3979	-0.07679	-76.7876	-0.17828	0.004885

30	0.119583	119.583	0.170333	170.3331	-0.16141	-161.41	-0.23643	0.00463
31	0.111698	111.6979	0.17639	176.39	-0.16427	-164.272	-0.23885	0.004372
32	0.103687	103.687	0.18256	182.5604	-0.16689	-166.893	-0.24111	0.00411
33	0.095562	95.56194	0.188836	188.8361	-0.16927	-169.27	-0.2432	0.003846
34	0.087335	87.33474	0.195209	195.2086	-0.1714	-171.398	-0.24511	0.003578
35	0.079017	79.01748	0.201669	201.6692	-0.17327	-173.275	-0.24685	0.003309
36	0.070622	70.62243	0.208209	208.2091	-0.1749	-174.895	-0.24842	0.003036
37	0.062162	62.16201	0.214819	214.8193	-0.17626	-176.257	-0.24981	0.002762
38	0.053649	53.64878	0.221491	221.4908	-0.17736	-177.357	-0.25102	0.002485
39	0.045095	45.09541	0.228214	228.2143	-0.17819	-178.194	-0.25206	0.002207
40	0.036515	36.51468	0.234981	234.9806	-0.17876	-178.764	-0.25291	0.001928
41	0.027919	27.91945	0.24178	241.7804	-0.17907	-179.066	-0.25359	0.001647
42	0.019323	19.32265	0.248604	248.6041	-0.1791	-179.099	-0.25408	0.001365
43	0.010737	10.73726	0.255442	255.4422	-0.17886	-178.861	-0.2544	0.001083
44	0.002176	2.176295	0.262285	262.2853	-0.17835	-178.352	-0.25453	0.0008
45	-0.00635	-6.34721	0.269124	269.1236	-0.17757	-177.572	-0.25449	0.000517
46	-0.01482	-14.8202	0.275948	275.9477	-0.17652	-176.52	-0.25427	0.000233
47	-0.02323	-23.2297	0.282748	282.7479	-0.1752	-175.196	-0.25387	-5E-05
48	-0.03156	-31.5646	0.289515	289.515	-0.17364	-173.643	-0.2533	-0.00033
49	-0.03982	-39.8224	0.296242	296.2417	-0.17204	-172.036	-0.25255	-0.00061
50	-0.048	-47.9997	0.302922	302.922	-0.17036	-170.358	-0.25163	-0.0009
51	-0.05609	-56.0923	0.30955	309.5497	-0.16859	-168.594	-0.25054	-0.00117
52	-0.0641	-64.0955	0.316118	316.1184	-0.16673	-166.732	-0.24928	-0.00145
53	-0.072	-72.004	0.322622	322.6217	-0.16476	-164.76	-0.24785	-0.00173
54	-0.07981	-79.8122	0.329053	329.0528	-0.16267	-162.67	-0.24626	-0.00201
55	-0.08751	-87.514	0.335405	335.4049	-0.16045	-160.453	-0.24451	-0.00228
56	-0.0951	-95.103	0.341671	341.6712	-0.1581	-158.103	-0.2426	-0.00255
57	-0.10257	-102.573	0.347845	347.8448	-0.15561	-155.614	-0.24053	-0.00282
58	-0.10992	-109.916	0.353919	353.9188	-0.15298	-152.983	-0.2383	-0.00308
59	-0.11713	-117.126	0.359886	359.8864	-0.15021	-150.207	-0.23593	-0.00335
60	-0.1242	-124.195	0.365741	365.7406	-0.14728	-147.283	-0.2334	-0.00361
61	-0.13112	-131.118	0.371475	371.4749	-0.14421	-144.21	-0.23072	-0.00386
62	-0.13789	-137.885	0.377082	377.0824	-0.14099	-140.987	-0.22791	-0.00412
63	-0.14449	-144.491	0.382557	382.5567	-0.13761	-137.614	-0.22495	-0.00436
64	-0.15093	-150.927	0.387891	387.8912	-0.13409	-134.091	-0.22186	-0.00461
65	-0.15719	-157.187	0.393308	393.0797	-0.13042	-130.421	-0.21863	-0.00485
66	-0.16326	-163.264	0.398116	398.1161	-0.12661	-126.606	-0.21527	-0.00509
67	-0.16915	-169.151	0.402994	402.9944	-0.12265	-122.646	-0.21179	-0.00532
68	-0.17484	-174.842	0.407709	407.7088	-0.11855	-118.546	-0.20819	-0.00555
69	-0.18033	-180.329	0.412254	412.2537	-0.11431	-114.309	-0.20447	-0.00577
70	-0.18561	-185.606	0.416624	416.6239	-0.10994	-109.939	-0.20064	-0.00599
71	-0.19067	-190.667	0.420814	420.8143	-0.10544	-105.439	-0.1967	-0.0062
72	-0.19551	-195.506	0.42482	424.8199	-0.10081	-100.815	-0.19265	-0.00641
73	-0.20012	-200.117	0.428636	428.6362	-0.09607	-96.0711	-0.18851	-0.00661
74	-0.2045	-204.496	0.432259	432.259	-0.09121	-91.2132	-0.18427	-0.00681
75	-0.20864	-208.636	0.435684	435.6843	-0.08625	-86.2466	-0.17994	-0.007

76	-0.21253	-212.532	0.438908	438.9082	-0.08118	-81.1773	-0.17553	-0.00719
77	-0.21618	-216.181	0.441928	441.9276	-0.07601	-76.0114	-0.17104	-0.00737
78	-0.21958	-219.577	0.444739	444.7392	-0.07076	-70.7554	-0.16648	-0.00754
79	-0.22272	-222.717	0.447341	447.3405	-0.06542	-65.4159	-0.16185	-0.00771
80	-0.2256	-225.597	0.449729	449.7291	-0.06	-59.9998	-0.15715	-0.00787
81	-0.22821	-228.214	0.451903	451.903	-0.05451	-54.5141	-0.1524	-0.00802
82	-0.23056	-230.564	0.453861	453.8607	-0.04897	-48.9661	-0.1476	-0.00817
83	-0.23265	-232.645	0.455601	455.6009	-0.04336	-43.3631	-0.14274	-0.00831
84	-0.23446	-234.456	0.457123	457.1229	-0.03771	-37.7127	-0.13785	-0.00845
85	-0.23599	-235.993	0.458426	458.4264	-0.03202	-32.0224	-0.13293	-0.00857
86	-0.23726	-237.255	0.459511	459.5114	-0.0263	-26.3	-0.12797	-0.0087
87	-0.23824	-238.242	0.460379	460.3785	-0.02055	-20.5532	-0.12299	-0.00881
88	-0.23895	-238.952	0.461029	461.0288	-0.01479	-14.79	-0.11799	-0.00892
89	-0.24429	-244.289	0.461464	461.4638	-0.16229	-162.289	-0.00636	-0.00902
90	-0.23954	-239.54	0.461686	461.6856	-0.00325	-3.24587	0.103118	-0.00893
91	-0.23942	-239.418	0.461696	461.6961	0.002542	2.541973	0.108135	-0.00884
92	-0.23902	-239.018	0.461494	461.4943	0.008337	8.3373	0.113145	-0.00875
93	-0.23834	-238.34	0.461078	461.0778	0.014132	14.13217	0.118144	-0.00864
94	-0.23738	-237.384	0.460445	460.4445	0.019919	19.91864	0.123127	-0.00853
95	-0.23615	-236.151	0.459593	459.5931	0.025689	25.68878	0.128086	-0.00842
96	-0.23464	-234.642	0.458523	458.5226	0.031435	31.43474	0.133016	-0.00829
97	-0.23286	-232.859	0.457232	457.2325	0.037149	37.14868	0.137913	-0.00816
98	-0.2308	-230.803	0.455723	455.7228	0.042823	42.82289	0.142768	-0.00802
99	-0.22848	-228.477	0.453994	453.9939	0.04845	48.44972	0.147578	-0.00788
100	-0.22588	-225.884	0.452047	452.0466	0.054022	54.02165	0.152337	-0.00773
101	-0.22303	-223.027	0.449882	449.8821	0.059531	59.5313	0.157038	-0.00757
102	-0.21991	-219.908	0.447502	447.5022	0.064971	64.97143	0.161677	-0.00741
103	-0.21653	-216.532	0.444909	444.9087	0.070335	70.33498	0.166248	-0.00724
104	-0.2129	-212.903	0.442104	442.1041	0.075615	75.61507	0.170745	-0.00706
105	-0.20902	-209.024	0.439091	439.0911	0.080805	80.80505	0.175164	-0.00688
106	-0.2049	-204.901	0.435873	435.8728	0.085898	85.89848	0.179499	-0.00669
107	-0.20054	-200.538	0.432452	432.4525	0.090889	90.88916	0.183745	-0.0065
108	-0.19594	-195.941	0.428834	428.834	0.095771	95.77118	0.187898	-0.0063
109	-0.19112	-191.115	0.425021	425.0213	0.100539	100.5389	0.191951	-0.0061
110	-0.18607	-186.066	0.421019	421.0187	0.105187	105.187	0.195901	-0.00589
111	-0.1808	-180.8	0.416831	416.8308	0.109711	109.7105	0.199743	-0.00568
112	-0.17532	-175.323	0.412462	412.4625	0.114105	114.1048	0.203473	-0.00546
113	-0.16964	-169.641	0.407919	407.9188	0.118366	118.3655	0.207086	-0.00523
114	-0.16376	-163.762	0.403205	403.2052	0.122489	122.4889	0.210578	-0.00501
115	-0.15769	-157.691	0.398327	398.3272	0.126472	126.4716	0.213944	-0.00477
116	-0.15144	-151.436	0.39329	393.2905	0.130311	130.3106	0.217182	-0.00454
117	-0.145	-145.004	0.388101	388.1012	0.134003	134.0033	0.220286	-0.0043
118	-0.1384	-138.401	0.382765	382.7654	0.137548	137.548	0.223254	-0.00405
119	-0.13164	-131.636	0.377289	377.2894	0.140943	140.9432	0.226082	-0.0038
120	-0.12472	-124.715	0.37168	371.6796	0.144188	144.1882	0.228767	-0.00355
121	-0.11765	-117.645	0.365943	365.9428	0.147283	147.2828	0.231305	-0.0033

122	-0.11043	-110.434	0.360085	360.0854	0.150228	150.2277	0.233694	-0.00304
123	-0.10309	-103.089	0.354114	354.1144	0.153024	153.0242	0.23593	-0.00278
124	-0.09562	-95.6168	0.348036	348.0365	0.155674	155.6744	0.238011	-0.00251
125	-0.08802	-88.024	0.341859	341.8586	0.158181	158.1814	0.239934	-0.00225
126	-0.08032	-80.3176	0.335588	335.5877	0.160549	160.5492	0.241697	-0.00198
127	-0.0725	-72.5039	0.329231	329.2307	0.162783	162.7828	0.243298	-0.00171
128	-0.06459	-64.5892	0.322794	322.7944	0.164889	164.8886	0.244734	-0.00143
129	-0.05658	-56.5792	0.316286	316.2856	0.166874	166.8741	0.246003	-0.00116
130	-0.04848	-48.4792	0.309711	309.711	0.168748	168.7483	0.247103	-0.00088
131	-0.04029	-40.2941	0.303077	303.0773	0.170522	170.5217	0.248033	-0.00061
132	-0.03203	-32.0281	0.296391	296.3909	0.172207	172.207	0.24879	-0.00033
133	-0.02368	-23.6847	0.289658	289.6581	0.173819	173.8186	0.249373	-5.2E-05
134	-0.01527	-15.2667	0.282885	282.8847	0.175373	175.3734	0.249781	0.000227
135	-0.00679	-6.78509	0.276078	276.0781	0.176699	176.6994	0.250012	0.000506
136	0.001747	1.747182	0.269248	269.2477	0.177754	177.7542	0.250065	0.000785
137	0.010317	10.31704	0.262403	262.4029	0.178537	178.5372	0.249939	0.001063
138	0.018911	18.91144	0.255553	255.5533	0.179049	179.0486	0.249633	0.001341
139	0.027517	27.51738	0.248709	248.7087	0.179289	179.2887	0.249146	0.001619
140	0.036122	36.12185	0.241878	241.8784	0.179258	179.2583	0.24848	0.001895
141	0.044712	44.71192	0.235072	235.0721	0.178958	178.9584	0.247633	0.00217
142	0.053275	53.27473	0.228299	228.2991	0.17839	178.3904	0.246607	0.002444
143	0.061798	61.7975	0.221569	221.569	0.177556	177.5562	0.245402	0.002716
144	0.070268	70.26754	0.214891	214.8908	0.176458	176.4577	0.244019	0.002986
145	0.078672	78.6723	0.208274	208.274	0.175098	175.0976	0.242459	0.003254
146	0.086999	86.99934	0.201727	201.7274	0.173479	173.4785	0.240724	0.00352
147	0.095236	95.23638	0.19526	195.2602	0.171604	171.6036	0.238816	0.003783
148	0.103371	103.3713	0.188881	188.8811	0.169476	169.4764	0.236736	0.004044
149	0.113675	113.6745	0.182599	182.5988	0.238422	238.4218	0.184871	0.004301
150	0.119287	119.2873	0.176422	176.4219	0.16448	164.4803	0.133847	0.004473
151	0.127045	127.0452	0.170359	170.3586	0.16162	161.62	0.131267	0.004641
152	0.134654	134.6544	0.164417	164.4173	0.158524	158.5243	0.128526	0.004806
153	0.142104	142.104	0.158606	158.6061	0.155198	155.1982	0.125628	0.004967
154	0.149383	149.3831	0.152933	152.933	0.151647	151.6472	0.122575	0.005124
155	0.156481	156.4812	0.147405	147.4054	0.147877	147.8767	0.119372	0.005276
156	0.163388	163.3881	0.142031	142.031	0.143893	143.8926	0.116022	0.005425
157	0.170094	170.0939	0.136817	136.817	0.139701	139.7012	0.112529	0.005569
158	0.176589	176.5887	0.13177	131.7701	0.135309	135.3088	0.108899	0.005708
159	0.182863	182.8634	0.126897	126.8973	0.130722	130.722	0.105134	0.005842
160	0.188909	188.909	0.122205	122.2048	0.125948	125.9479	0.101241	0.005972
161	0.194717	194.7167	0.117699	117.6988	0.120994	120.9936	0.097223	0.006096
162	0.200278	200.2784	0.113385	113.3852	0.115866	115.8664	0.093086	0.006215
163	0.205586	205.586	0.10927	109.2696	0.110574	110.5739	0.088836	0.006328
164	0.210632	210.632	0.105357	105.3571	0.105124	105.124	0.084477	0.006437
165	0.215409	215.4092	0.101653	101.6526	0.099525	99.52463	0.080015	0.006539
166	0.219911	219.9109	0.098161	98.16087	0.093784	93.78397	0.075456	0.006636
167	0.224131	224.1306	0.094886	94.88602	0.08791	87.91038	0.070805	0.006726

168	0.228062	228.0624	0.091832	91.832	0.081912	81.91239	0.066069	0.006811
169	0.231701	231.7008	0.089002	89.00238	0.075799	75.79865	0.061254	0.00689
170	0.235041	235.0405	0.0864	86.40036	0.069578	69.57796	0.056366	0.006963
171	0.238077	238.077	0.084029	84.02876	0.063259	63.25925	0.051411	0.007029
172	0.240806	240.8059	0.08189	81.89005	0.056852	56.85157	0.046396	0.007089
173	0.243223	243.2234	0.079986	79.9863	0.050364	50.36405	0.041327	0.007143
174	0.245326	245.3261	0.078319	78.31922	0.043806	43.80592	0.03621	0.00719
175	0.247111	247.1111	0.07689	76.8901	0.037186	37.18648	0.031053	0.00723
176	0.248576	248.5758	0.0757	75.69984	0.030515	30.51509	0.025862	0.007265
177	0.249718	249.7183	0.074749	74.74894	0.023801	23.80117	0.020643	0.007292
178	0.250537	250.5369	0.074037	74.03749	0.017054	17.05416	0.015404	0.007313
179	0.251031	251.0305	0.073565	73.56516	0.010284	10.28352	0.010151	0.007328
180	0.251198	251.1984	0.073331	73.33121	0.003499	3.498722	0.004891	0.007336
181	0.25104	251.0405	0.073334	73.33447	-0.00329	-3.29077	-0.00037	0.007337
182	0.250557	250.5569	0.073574	73.57445	-0.01008	-10.0755	-0.00562	0.007331
183	0.249748	249.7482	0.074052	74.05229	-0.01685	-16.846	-0.01086	0.007319
184	0.248616	248.6158	0.074769	74.76871	-0.02359	-23.5928	-0.01608	0.0073
185	0.247161	247.1611	0.075724	75.72406	-0.03031	-30.3065	-0.02127	0.007275
186	0.245386	245.3861	0.076918	76.91825	-0.03698	-36.9776	-0.02643	0.007243
187	0.243293	243.2934	0.078351	78.35079	-0.0436	-43.5968	-0.03155	0.007205
188	0.240886	240.886	0.080021	80.02077	-0.05015	-50.1546	-0.03662	0.00716
189	0.238167	238.1672	0.081927	81.9269	-0.05664	-56.6418	-0.04164	0.007109
190	0.235141	235.1408	0.084068	84.0675	-0.06305	-63.0491	-0.04659	0.007051
191	0.231811	231.8111	0.08644	86.4405	-0.06937	-69.3675	-0.05148	0.006987
192	0.228183	228.1829	0.089043	89.04344	-0.07559	-75.5879	-0.0563	0.006917
193	0.224261	224.2612	0.091873	91.87349	-0.0817	-81.7014	-0.06104	0.006841
194	0.220052	220.0516	0.094927	94.92747	-0.0877	-87.6991	-0.06569	0.006759
195	0.21556	215.5601	0.098202	98.20183	-0.09357	-93.5725	-0.07026	0.006671
196	0.210793	210.793	0.101693	101.6927	-0.09931	-99.313	-0.07472	0.006577
197	0.205757	205.7572	0.105396	105.3957	-0.10491	-104.912	-0.07908	0.006478
198	0.20046	200.4597	0.109306	109.3064	-0.11036	-110.362	-0.08334	0.006373
199	0.194908	194.9083	0.11342	113.4198	-0.11565	-115.655	-0.08748	0.006262
200	0.189111	189.1107	0.117731	117.7307	-0.12078	-120.782	-0.0915	0.006146
201	0.183075	183.0753	0.122234	122.2336	-0.12574	-125.736	-0.0954	0.006025
202	0.176811	176.8107	0.126923	126.9226	-0.13051	-130.511	-0.09917	0.005899
203	0.170326	170.3259	0.131792	131.7915	-0.1351	-135.098	-0.1028	0.005768
204	0.16363	163.6303	0.136834	136.8341	-0.13949	-139.491	-0.1063	0.005632
205	0.156733	156.7335	0.142044	142.0435	-0.14368	-143.683	-0.10965	0.005492
206	0.149645	149.6454	0.147413	147.4129	-0.14767	-147.668	-0.11286	0.005347
207	0.142376	142.3763	0.152935	152.9349	-0.15144	-151.439	-0.11592	0.005198
208	0.134937	134.9366	0.158602	158.6023	-0.15499	-154.991	-0.11883	0.005045
209	0.129946	129.9463	0.164407	164.4073	-0.07679	-76.7876	-0.17829	0.004888
210	0.119589	119.5893	0.170342	170.3421	-0.16141	-161.415	-0.23644	0.004634
211	0.111704	111.704	0.176399	176.3985	-0.16428	-164.276	-0.23886	0.004376
212	0.103693	103.6928	0.182569	182.5686	-0.1669	-166.898	-0.24112	0.004114
213	0.095568	95.56753	0.188844	188.844	-0.16928	-169.276	-0.24321	0.00385

214	0.08734	87.34005	0.195216	195.2161	-0.1714	-171.404	-0.24512	0.003582
215	0.079022	79.02248	0.201676	201.6764	-0.17328	-173.281	-0.24687	0.003312
216	0.070627	70.6271	0.208216	208.216	-0.1749	-174.902	-0.24843	0.00304
217	0.062166	62.16633	0.214826	214.8259	-0.17626	-176.265	-0.24982	0.002765
218	0.053653	53.65272	0.221497	221.4972	-0.17737	-177.365	-0.25104	0.002489
219	0.045099	45.09896	0.22822	228.2205	-0.1782	-178.202	-0.25207	0.002211
220	0.036518	36.51781	0.234987	234.9866	-0.17877	-178.772	-0.25293	0.001931
221	0.027922	27.92214	0.241786	241.7862	-0.17907	-179.075	-0.2536	0.00165
222	0.019325	19.32488	0.24861	248.6097	-0.17911	-179.108	-0.25409	0.001369
223	0.010739	10.73901	0.255448	255.4478	-0.17887	-178.871	-0.25441	0.001086
224	0.002178	2.177533	0.262291	262.2907	-0.17836	-178.363	-0.25455	0.000803
225	-0.00635	-6.3465	0.269129	269.129	-0.17758	-177.583	-0.2545	0.00052
226	-0.01482	-14.8201	0.275953	275.953	-0.17653	-176.531	-0.25428	0.000237
227	-0.02323	-23.2301	0.282753	282.7532	-0.17521	-175.208	-0.25388	-4.7E-05
228	-0.03157	-31.5655	0.28952	289.5203	-0.17365	-173.653	-0.25331	-0.00033
229	-0.03982	-39.8237	0.296247	296.2469	-0.17204	-172.044	-0.25256	-0.00061
230	-0.048	-48.0013	0.302927	302.9271	-0.17036	-170.365	-0.25164	-0.00089
231	-0.05609	-56.0942	0.309555	309.5548	-0.1686	-168.6	-0.25055	-0.00117
232	-0.0641	-64.0976	0.316123	316.1235	-0.16674	-166.737	-0.24929	-0.00145
233	-0.07201	-72.0063	0.322627	322.6267	-0.16476	-164.764	-0.24787	-0.00173
234	-0.07981	-79.8147	0.329058	329.0577	-0.16267	-162.672	-0.24628	-0.002
235	-0.08752	-87.5165	0.33541	335.4097	-0.16045	-160.455	-0.24452	-0.00228
236	-0.09511	-95.1056	0.341676	341.6759	-0.1581	-158.104	-0.24261	-0.00255
237	-0.10258	-102.575	0.347849	347.8494	-0.15561	-155.615	-0.24054	-0.00282
238	-0.10992	-109.918	0.353923	353.9233	-0.15298	-152.984	-0.23831	-0.00308
239	-0.11713	-117.128	0.359891	359.8908	-0.15021	-150.207	-0.23594	-0.00334
240	-0.1242	-124.198	0.365745	365.745	-0.14728	-147.282	-0.23341	-0.0036
241	-0.13112	-131.12	0.371479	371.4792	-0.14421	-144.209	-0.23074	-0.00386
242	-0.13789	-137.887	0.377087	377.0867	-0.14099	-140.985	-0.22792	-0.00411
243	-0.14449	-144.493	0.382561	382.5609	-0.13761	-137.612	-0.22496	-0.00436
244	-0.15093	-150.929	0.387895	387.8954	-0.13409	-134.09	-0.22187	-0.00461
245	-0.15719	-157.189	0.393084	393.0838	-0.13042	-130.42	-0.21864	-0.00485
246	-0.16327	-163.267	0.39812	398.1202	-0.1266	-126.604	-0.21528	-0.00509
247	-0.16915	-169.154	0.402998	402.9984	-0.12264	-122.644	-0.2118	-0.00532
248	-0.17484	-174.844	0.407713	407.7127	-0.11854	-118.544	-0.2082	-0.00555
249	-0.18033	-180.33	0.412258	412.2576	-0.11431	-114.307	-0.20448	-0.00577
250	-0.18561	-185.607	0.416628	416.6278	-0.10994	-109.937	-0.20065	-0.00599
251	-0.19067	-190.668	0.420818	420.8181	-0.10544	-105.437	-0.19671	-0.0062
252	-0.19551	-195.508	0.424824	424.8237	-0.10081	-100.813	-0.19266	-0.00641
253	-0.20012	-200.119	0.42864	428.64	-0.09607	-96.0691	-0.18852	-0.00661
254	-0.2045	-204.497	0.432263	432.2627	-0.09121	-91.2111	-0.18428	-0.00681
255	-0.20864	-208.637	0.435688	435.6879	-0.08624	-86.2446	-0.17996	-0.007
256	-0.21253	-212.533	0.438912	438.9118	-0.08118	-81.1753	-0.17554	-0.00719
257	-0.21618	-216.182	0.441931	441.931	-0.07601	-76.0094	-0.17105	-0.00736
258	-0.21958	-219.578	0.444743	444.7426	-0.07075	-70.7534	-0.16649	-0.00754
259	-0.22272	-222.718	0.447344	447.3438	-0.06541	-65.414	-0.16186	-0.00771

260	-0.2256	-225.598	0.449732	449.7322	-0.06	-59.9979	-0.15716	-0.00787
261	-0.22821	-228.214	0.451906	451.906	-0.05451	-54.5122	-0.15241	-0.00802
262	-0.23056	-230.565	0.453863	453.8635	-0.04896	-48.9642	-0.14761	-0.00817
263	-0.23265	-232.646	0.455604	455.6035	-0.04336	-43.3613	-0.14275	-0.00831
264	-0.23446	-234.456	0.457125	457.1253	-0.03771	-37.7108	-0.13786	-0.00845
265	-0.23599	-235.993	0.458429	458.4285	-0.03202	-32.0205	-0.13294	-0.00857
266	-0.23726	-237.256	0.459513	459.5133	-0.0263	-26.2981	-0.12798	-0.00869
267	-0.23824	-238.242	0.46038	460.3801	-0.02055	-20.5514	-0.123	-0.00881
268	-0.23895	-238.952	0.46103	461.03	-0.01479	-14.7882	-0.118	-0.00892
269	-0.24429	-244.289	0.461465	461.4646	-0.16229	-162.287	-0.00637	-0.00902
270	-0.23954	-239.54	0.461686	461.6859	-0.00324	-3.24405	0.103108	-0.00893
271	-0.23942	-239.418	0.461696	461.6959	0.002544	2.543787	0.108124	-0.00884
272	-0.23902	-239.018	0.461494	461.4937	0.008339	8.339116	0.113134	-0.00875
273	-0.23834	-238.34	0.461077	461.0767	0.014134	14.13399	0.118134	-0.00864
274	-0.23738	-237.383	0.460443	460.4431	0.01992	19.92046	0.123116	-0.00853
275	-0.23615	-236.15	0.459591	459.5914	0.025691	25.69062	0.128075	-0.00842
276	-0.23464	-234.641	0.458521	458.5206	0.031437	31.43658	0.133006	-0.00829
277	-0.23286	-232.858	0.45723	457.2303	0.037151	37.15054	0.137902	-0.00816
278	-0.2308	-230.802	0.45572	455.7203	0.042825	42.82476	0.142758	-0.00802
279	-0.22848	-228.477	0.453991	453.9912	0.048452	48.45161	0.147568	-0.00788
280	-0.22588	-225.883	0.452044	452.0438	0.054024	54.02356	0.152326	-0.00773
281	-0.22303	-223.026	0.449879	449.8792	0.059533	59.53323	0.157028	-0.00757
282	-0.21991	-219.907	0.447499	447.4991	0.064973	64.97338	0.161666	-0.00741
283	-0.21653	-216.531	0.444906	444.9056	0.070337	70.33695	0.166237	-0.00724
284	-0.2129	-212.901	0.442101	442.1009	0.075617	75.61707	0.170735	-0.00706
285	-0.20902	-209.023	0.439088	439.0878	0.080807	80.80707	0.175153	-0.00688
286	-0.2049	-204.899	0.435869	435.8694	0.085901	85.90052	0.179488	-0.0067
287	-0.20054	-200.536	0.432449	432.449	0.090891	90.89121	0.183734	-0.0065
288	-0.19594	-195.939	0.42883	428.8304	0.095773	95.77324	0.187887	-0.00631
289	-0.19111	-191.113	0.425018	425.0177	0.100541	100.541	0.19194	-0.0061
290	-0.18606	-186.064	0.421015	421.015	0.105189	105.1891	0.19589	-0.00589
291	-0.1808	-180.798	0.416827	416.8271	0.109713	109.7125	0.199732	-0.00568
292	-0.17532	-175.321	0.412459	412.4587	0.114107	114.1068	0.203462	-0.00546
293	-0.16964	-169.639	0.407915	407.915	0.118367	118.3675	0.207075	-0.00524
294	-0.16376	-163.759	0.403201	403.2014	0.122491	122.4908	0.210566	-0.00501
295	-0.15769	-157.689	0.398323	398.3233	0.126473	126.4734	0.213933	-0.00478
296	-0.15143	-151.434	0.393287	393.2866	0.130312	130.3122	0.21717	-0.00454
297	-0.145	-145.001	0.388097	388.0972	0.134005	134.0048	0.220275	-0.0043
298	-0.1384	-138.399	0.382761	382.7613	0.137549	137.5493	0.223243	-0.00405
299	-0.13163	-131.634	0.377285	377.2853	0.140944	140.9443	0.226071	-0.00381
300	-0.12471	-124.712	0.371675	371.6755	0.144189	144.1891	0.228755	-0.00355
301	-0.11764	-117.643	0.365939	365.9385	0.147283	147.2834	0.231294	-0.0033
302	-0.11043	-110.432	0.360081	360.0811	0.150228	150.2279	0.233682	-0.00304
303	-0.10309	-103.087	0.35411	354.11	0.153024	153.0239	0.235918	-0.00278
304	-0.09561	-95.6141	0.348032	348.032	0.155674	155.6737	0.237999	-0.00251
305	-0.08802	-88.0214	0.341854	341.8541	0.15818	158.1801	0.239923	-0.00225

306	-0.08032	-80.3151	0.335583	335.5831	0.160547	160.5472	0.241686	-0.00198
307	-0.0725	-72.5016	0.329226	329.226	0.16278	162.7801	0.243286	-0.00171
308	-0.06459	-64.587	0.32279	322.7896	0.164885	164.885	0.244722	-0.00144
309	-0.05658	-56.5772	0.316281	316.2807	0.16687	166.8695	0.245991	-0.00116
310	-0.04848	-48.4775	0.309706	309.7061	0.168743	168.7426	0.247091	-0.00089
311	-0.04029	-40.2927	0.303072	303.0723	0.170515	170.5147	0.248021	-0.00061
312	-0.03203	-32.0271	0.296386	296.3859	0.172198	172.1985	0.248778	-0.00033
313	-0.02368	-23.6843	0.289653	289.653	0.173808	173.8084	0.249361	-5.5E-05
314	-0.01527	-15.2668	0.28288	282.8796	0.175361	175.3613	0.249769	0.000224
315	-0.00679	-6.78576	0.276073	276.073	0.176688	176.6878	0.25	0.000503
316	0.001746	1.745976	0.269242	269.2425	0.177743	177.743	0.250053	0.000781
317	0.010315	10.31532	0.262398	262.3976	0.178527	178.5265	0.249927	0.00106
318	0.018909	18.90924	0.255548	255.5479	0.179038	179.0384	0.249621	0.001338
319	0.027515	27.5147	0.248703	248.7032	0.179279	179.279	0.249134	0.001615
320	0.036119	36.11873	0.241873	241.8727	0.179249	179.2491	0.248468	0.001892
321	0.044708	44.70839	0.235066	235.0662	0.17895	178.9496	0.247622	0.002167
322	0.053271	53.2708	0.228293	228.2931	0.178382	178.3821	0.246595	0.00244
323	0.061793	61.7932	0.221563	221.5627	0.177548	177.5483	0.24539	0.002713
324	0.070263	70.26288	0.214884	214.8843	0.17645	176.4504	0.244007	0.002983
325	0.078667	78.66731	0.208267	208.2672	0.175091	175.0907	0.242448	0.003251
326	0.086994	86.99404	0.20172	201.7204	0.173472	173.472	0.240713	0.003517
327	0.095231	95.23079	0.195253	195.2529	0.171598	171.5976	0.238804	0.00378
328	0.103365	103.3655	0.188873	188.8734	0.169471	169.4707	0.236724	0.00404
329	0.113668	113.6683	0.182591	182.5908	0.238413	238.4126	0.184862	0.004297
330	0.119281	119.281	0.176413	176.4134	0.164475	164.4754	0.133841	0.004469
331	0.127039	127.0386	0.17035	170.3498	0.161615	161.6154	0.131262	0.004637
332	0.134648	134.6476	0.164408	164.4081	0.15852	158.5201	0.128521	0.004802
333	0.142097	142.097	0.158596	158.5965	0.155194	155.1943	0.125623	0.004963
334	0.149376	149.376	0.152923	152.9228	0.151644	151.6436	0.12257	0.00512
335	0.156474	156.4739	0.147395	147.3948	0.147873	147.8733	0.119367	0.005272
336	0.163381	163.3807	0.14202	142.02	0.14389	143.8896	0.116017	0.005421
337	0.170086	170.0863	0.136805	136.8054	0.139698	139.6984	0.112525	0.005565
338	0.176581	176.581	0.131758	131.758	0.135306	135.3062	0.108894	0.005704
339	0.182856	182.8556	0.126885	126.8847	0.13072	130.7196	0.10513	0.005838
340	0.188901	188.9011	0.122192	122.1916	0.125946	125.9457	0.101237	0.005967
341	0.194709	194.7087	0.117685	117.6851	0.120991	120.9915	0.097219	0.006092
342	0.20027	200.2702	0.113371	113.371	0.115864	115.8644	0.093083	0.006211
343	0.205578	205.5777	0.109255	109.2548	0.110572	110.572	0.088832	0.006324
344	0.210624	210.6237	0.105342	105.3417	0.105122	105.1222	0.084473	0.006432
345	0.215401	215.4008	0.101637	101.6367	0.099523	99.52282	0.080012	0.006535
346	0.219902	219.9024	0.098144	98.14434	0.093782	93.78217	0.075453	0.006631
347	0.224122	224.122	0.094869	94.86892	0.087909	87.90857	0.070802	0.006722
348	0.228054	228.0538	0.091814	91.81434	0.081911	81.91052	0.066067	0.006807
349	0.231692	231.692	0.088984	88.98414	0.075797	75.7967	0.061252	0.006886
350	0.235032	235.0317	0.086382	86.38155	0.069576	69.57591	0.056364	0.006958
351	0.238068	238.0681	0.084009	84.00939	0.063257	63.25707	0.051409	0.007025

352	0.240797	240.7969	0.08187	81.87013	0.056849	56.84923	0.046394	0.007085
353	0.243214	243.2142	0.079966	79.96584	0.050362	50.36152	0.041325	0.007138
354	0.245317	245.3168	0.078298	78.29823	0.043803	43.80317	0.036209	0.007185
355	0.247102	247.1016	0.076869	76.8686	0.037183	37.18348	0.031052	0.007226
356	0.248566	248.5662	0.075678	75.67784	0.030512	30.51181	0.025861	0.00726
357	0.249708	249.7085	0.074726	74.72647	0.023798	23.79759	0.020642	0.007288
358	0.250527	250.5269	0.074015	74.01457	0.01705	17.05024	0.015404	0.007309
359	0.25102	251.0203	0.073542	73.54181	0.010279	10.27923	0.010151	0.007323
360	0.251188	251.188	0.073311	73.31057	0.003286	3.285978	0.004891	0.007331

3. Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей и коэффициент жесткости при вращении стыки  $\lambda = 0.5$

Угол, градус	M, Нм	M, кНм	T, Н	T, кН	V, Н	V, кН	u <sub>1</sub> , м	u <sub>2</sub> , м
0	0.078034	78.03441	0.025541	25.54145	0.000923	0.923398	-0.00058	0.00199
1	0.077984	77.98364	0.025541	25.54145	-0.00092	-0.9234	-0.00245	0.001988
2	0.07783	77.83044	0.025607	25.60694	-0.00279	-2.7868	-0.00432	0.001984
3	0.077575	77.57501	0.025739	25.73852	-0.00465	-4.64619	-0.00619	0.001978
4	0.077218	77.21772	0.025936	25.93647	-0.0065	-6.49891	-0.00804	0.001969
5	0.076759	76.7591	0.026201	26.20094	-0.00834	-8.34228	-0.00989	0.001957
6	0.0762	76.19979	0.026532	26.53197	-0.01017	-10.1736	-0.01172	0.001944
7	0.075541	75.54062	0.02693	26.9295	-0.01199	-11.9903	-0.01354	0.001928
8	0.074783	74.78252	0.027393	27.39332	-0.01379	-13.7896	-0.01535	0.001909
9	0.073927	73.9266	0.027923	27.92311	-0.01557	-15.569	-0.01713	0.001889
10	0.072974	72.9741	0.028518	28.51846	-0.01733	-17.3258	-0.01889	0.001866
11	0.071926	71.92639	0.029179	29.17881	-0.01906	-19.0574	-0.02063	0.001841
12	0.070785	70.78502	0.029904	29.90351	-0.02076	-20.7613	-0.02234	0.001813
13	0.069552	69.55163	0.030692	30.69179	-0.02244	-22.435	-0.02403	0.001784
14	0.068228	68.22803	0.031543	31.5428	-0.02408	-24.0759	-0.02568	0.001752
15	0.066816	66.81615	0.032456	32.45556	-0.02568	-25.6817	-0.0273	0.001718
16	0.065318	65.31807	0.033429	33.42899	-0.02725	-27.2498	-0.02888	0.001682
17	0.063736	63.73597	0.034462	34.46192	-0.02878	-28.778	-0.03043	0.001644
18	0.062072	62.07219	0.035553	35.55307	-0.03026	-30.2638	-0.03194	0.001605
19	0.060329	60.32917	0.036701	36.70107	-0.03171	-31.7051	-0.03341	0.001563
20	0.058509	58.50948	0.037904	37.90448	-0.0331	-33.0996	-0.03483	0.001519
21	0.056616	56.61582	0.039162	39.16172	-0.03445	-34.4452	-0.03622	0.001474
22	0.054651	54.65099	0.040471	40.47119	-0.03574	-35.7398	-0.03755	0.001427
23	0.052618	52.6179	0.041831	41.83114	-0.03698	-36.9813	-0.03884	0.001378
24	0.05052	50.51959	0.04324	43.23978	-0.03817	-38.1679	-0.04007	0.001327
25	0.048359	48.35917	0.044695	44.69523	-0.0393	-39.2975	-0.04126	0.001275
26	0.04614	46.13987	0.046196	46.19554	-0.04037	-40.3684	-0.04239	0.001222
27	0.043865	43.86503	0.047739	47.73868	-0.04138	-41.3789	-0.04347	0.001167
28	0.041538	41.53805	0.049323	49.32256	-0.04233	-42.3272	-0.0445	0.001111
29	0.000361	0.360604	0.050945	50.94501	-0.01826	-18.2574	-0.04579	0.001053

30	0.036742	36.74177	0.052604	52.60381	-0.04403	-44.0312	-0.047	0.000993
31	0.03428	34.27973	0.054297	54.29668	-0.04478	-44.784	-0.04786	0.000933
32	0.03178	31.78004	0.056021	56.02128	-0.04547	-45.4688	-0.04865	0.000871
33	0.029247	29.24651	0.057775	57.77523	-0.04608	-46.0843	-0.04938	0.000809
34	0.026683	26.68301	0.059556	59.55608	-0.04663	-46.6295	-0.05005	0.000745
35	0.024093	24.09346	0.061361	61.36136	-0.0471	-47.1032	-0.05066	0.000681
36	0.021482	21.48185	0.063189	63.18854	-0.0475	-47.5045	-0.05121	0.000615
37	0.018852	18.85221	0.065035	65.03506	-0.04783	-47.8325	-0.05169	0.00055
38	0.016209	16.20861	0.066898	66.89832	-0.04809	-48.0864	-0.05211	0.000483
39	0.013555	13.55516	0.068776	68.77569	-0.04827	-48.2655	-0.05247	0.000416
40	0.010896	10.89601	0.070665	70.66453	-0.04837	-48.3693	-0.05276	0.000349
41	0.008235	8.235329	0.072562	72.56215	-0.0484	-48.3972	-0.05299	0.000281
42	0.005577	5.577304	0.074466	74.46586	-0.04835	-48.3488	-0.05316	0.000213
43	0.002926	2.926145	0.076373	76.37295	-0.04822	-48.2239	-0.05326	0.000145
44	0.000286	0.286074	0.078281	78.28069	-0.04802	-48.0223	-0.0533	7.67E-05
45	-0.00234	-2.33869	0.080186	80.18636	-0.04774	-47.7437	-0.05327	8.34E-06
46	-0.00494	-4.94391	0.082087	82.08722	-0.04739	-47.3884	-0.05318	-6E-05
47	-0.00753	-7.52837	0.083981	83.98101	-0.04701	-47.0107	-0.05304	-0.00013
48	-0.01009	-10.0911	0.085866	85.86597	-0.04661	-46.6147	-0.05282	-0.0002
49	-0.01263	-12.6308	0.08774	87.74037	-0.0462	-46.1973	-0.05255	-0.00026
50	-0.01515	-15.1463	0.089602	89.60243	-0.04576	-45.7556	-0.05222	-0.00033
51	-0.01764	-17.636	0.09145	91.45033	-0.04529	-45.2869	-0.05183	-0.0004
52	-0.0201	-20.0983	0.093282	93.28219	-0.04479	-44.789	-0.05137	-0.00046
53	-0.02253	-22.5315	0.095096	95.09615	-0.04426	-44.2599	-0.05086	-0.00053
54	-0.02493	-24.9338	0.09689	96.89028	-0.0437	-43.6977	-0.05029	-0.00059
55	-0.0273	-27.3033	0.098663	98.66268	-0.0431	-43.1009	-0.04967	-0.00066
56	-0.02964	-29.6381	0.100411	100.4114	-0.04247	-42.4683	-0.04898	-0.00072
57	-0.03194	-31.936	0.102135	102.1346	-0.0418	-41.7987	-0.04824	-0.00078
58	-0.0342	-34.195	0.10383	103.8302	-0.04109	-41.0913	-0.04745	-0.00085
59	-0.03693	-36.9282	0.105496	105.4964	-0.06355	-63.5478	-0.04631	-0.00091
60	-0.03859	-38.5879	0.107131	107.1313	-0.03956	-39.5604	-0.04512	-0.00096
61	-0.04072	-40.7175	0.108733	108.733	-0.03874	-38.7358	-0.04417	-0.00102
62	-0.0428	-42.7995	0.1103	110.2997	-0.03787	-37.8716	-0.04317	-0.00108
63	-0.04483	-44.8318	0.111829	111.8295	-0.03697	-36.9676	-0.04212	-0.00113
64	-0.04681	-46.8123	0.113321	113.3205	-0.03602	-36.0241	-0.04102	-0.00119
65	-0.04874	-48.7387	0.114771	114.7712	-0.03504	-35.0414	-0.03987	-0.00124
66	-0.05061	-50.609	0.11618	116.1798	-0.03402	-34.0198	-0.03868	-0.00129
67	-0.05242	-52.421	0.117545	117.5445	-0.03296	-32.9601	-0.03744	-0.00134
68	-0.05417	-54.1727	0.118864	118.8639	-0.03186	-31.8628	-0.03616	-0.00139
69	-0.05586	-55.8621	0.120136	120.1362	-0.03073	-30.7288	-0.03484	-0.00143
70	-0.05749	-57.4871	0.12136	121.3602	-0.02956	-29.559	-0.03349	-0.00148
71	-0.05905	-59.0459	0.122534	122.5343	-0.02835	-28.3545	-0.03209	-0.00152
72	-0.06054	-60.5367	0.123657	123.6571	-0.02712	-27.1163	-0.03065	-0.00156
73	-0.06196	-61.9575	0.124727	124.7274	-0.02585	-25.8456	-0.02918	-0.0016
74	-0.06331	-63.3069	0.125744	125.7439	-0.02454	-24.5438	-0.02768	-0.00163
75	-0.06458	-64.583	0.126706	126.7056	-0.02321	-23.2122	-0.02615	-0.00167

76	-0.06578	-65.7843	0.127611	127.6112	-0.02185	-21.8524	-0.02458	-0.0017
77	-0.06691	-66.9095	0.12846	128.46	-0.02047	-20.4657	-0.02299	-0.00173
78	-0.06796	-67.957	0.129251	129.2508	-0.01905	-19.0539	-0.02137	-0.00176
79	-0.06893	-68.9256	0.129983	129.9831	-0.01762	-17.6185	-0.01973	-0.00179
80	-0.06981	-69.8141	0.130656	130.6559	-0.01616	-16.1614	-0.01807	-0.00181
81	-0.07062	-70.6213	0.131269	131.2688	-0.01468	-14.6841	-0.01638	-0.00183
82	-0.07135	-71.3464	0.131821	131.8211	-0.01319	-13.1886	-0.01468	-0.00185
83	-0.07199	-71.9883	0.132312	132.3124	-0.01168	-11.6767	-0.01296	-0.00187
84	-0.07255	-72.5463	0.132742	132.7424	-0.01015	-10.1502	-0.01123	-0.00189
85	-0.07302	-73.0197	0.133111	133.111	-0.00861	-8.61115	-0.00948	-0.0019
86	-0.07341	-73.408	0.133418	133.4178	-0.00706	-7.06136	-0.00773	-0.00191
87	-0.07371	-73.7105	0.133663	133.663	-0.0055	-5.50283	-0.00596	-0.00192
88	-0.07393	-73.9269	0.133847	133.8465	-0.00394	-3.93752	-0.00419	-0.00193
89	-0.00068	-0.68191	0.133969	133.9687	-0.04956	-49.5568	-0.00181	-0.00193
90	-0.0741	-74.1008	0.13403	134.0297	-0.00079	-0.79448	0.00055	-0.00193
91	-0.07406	-74.0579	0.13403	134.03	0.00078	0.779593	0.002327	-0.00193
92	-0.07393	-73.9286	0.13397	133.9697	0.002353	2.352817	0.004102	-0.00192
93	-0.07371	-73.7129	0.133848	133.8482	0.003923	3.923219	0.005873	-0.00192
94	-0.07341	-73.4111	0.133665	133.6652	0.005489	5.488817	0.007637	-0.00191
95	-0.07302	-73.0237	0.133421	133.4207	0.007048	7.047637	0.009394	-0.0019
96	-0.07255	-72.551	0.133114	133.1144	0.008598	8.597711	0.01114	-0.00189
97	-0.07199	-71.9937	0.132746	132.7464	0.010137	10.13709	0.012874	-0.00187
98	-0.07135	-71.3525	0.132317	132.3169	0.011664	11.66383	0.014593	-0.00185
99	-0.07063	-70.6281	0.131826	131.8261	0.013176	13.17604	0.016296	-0.00183
100	-0.06982	-69.8215	0.131274	131.2743	0.014672	14.67183	0.017981	-0.00181
101	-0.06893	-68.9337	0.130662	130.662	0.016149	16.14936	0.019645	-0.00179
102	-0.06797	-67.9657	0.12999	129.9896	0.017607	17.60682	0.021287	-0.00176
103	-0.06692	-66.9189	0.129258	129.2578	0.019042	19.04245	0.022905	-0.00173
104	-0.06579	-65.7944	0.128467	128.4674	0.020455	20.45455	0.024497	-0.0017
105	-0.06459	-64.5936	0.127619	127.6191	0.021841	21.84146	0.026061	-0.00167
106	-0.06332	-63.3181	0.126714	126.7138	0.023202	23.20159	0.027595	-0.00163
107	-0.06197	-61.9693	0.125753	125.7526	0.024533	24.53341	0.029098	-0.0016
108	-0.06055	-60.549	0.124736	124.7364	0.025835	25.83545	0.030568	-0.00156
109	-0.05906	-59.0588	0.123667	123.6665	0.027106	27.10635	0.032002	-0.00152
110	-0.0575	-57.5005	0.122544	122.5441	0.028345	28.34479	0.033401	-0.00148
111	-0.05588	-55.876	0.12137	121.3704	0.02955	29.54957	0.034761	-0.00143
112	-0.05419	-54.1872	0.120147	120.1468	0.03072	30.71956	0.036081	-0.00139
113	-0.05244	-52.436	0.118875	118.8747	0.031854	31.85374	0.03736	-0.00134
114	-0.05062	-50.6244	0.117556	117.5557	0.032951	32.95119	0.038596	-0.00129
115	-0.04875	-48.7546	0.116191	116.1913	0.034011	34.01109	0.039788	-0.00124
116	-0.04683	-46.8287	0.114783	114.7831	0.035033	35.03276	0.040934	-0.00119
117	-0.04485	-44.8487	0.113333	113.3327	0.036016	36.01563	0.042034	-0.00113
118	-0.04282	-42.8168	0.111842	111.8419	0.036959	36.95923	0.043086	-0.00108
119	-0.04131	-41.3115	0.110312	110.3124	0.011907	11.90666	0.044421	-0.00102
120	-0.03861	-38.6062	0.108746	108.7461	0.038728	38.72758	0.045692	-0.00097
121	-0.03643	-36.4317	0.107145	107.1447	0.039552	39.5524	0.046592	-0.00091

122	-0.03421	-34.2141	0.10551	105.5101	0.040338	40.33791	0.04744	-0.00085
123	-0.03196	-31.9554	0.103844	103.8441	0.041084	41.08441	0.048234	-0.00078
124	-0.02966	-29.6579	0.102149	102.1487	0.041792	41.79242	0.048973	-0.00072
125	-0.02732	-27.3234	0.100426	100.4258	0.042463	42.46262	0.049656	-0.00066
126	-0.02495	-24.9542	0.098677	98.67726	0.043096	43.09588	0.050283	-0.00059
127	-0.02255	-22.5521	0.096905	96.90506	0.043693	43.6933	0.050853	-0.00053
128	-0.02012	-20.1191	0.095111	95.11111	0.044256	44.25617	0.051365	-0.00046
129	-0.01766	-17.6569	0.093297	93.29732	0.044786	44.78602	0.051818	-0.0004
130	-0.01517	-15.1674	0.091466	91.46561	0.045285	45.28463	0.052212	-0.00033
131	-0.01265	-12.652	0.089618	89.61785	0.045754	45.75404	0.052545	-0.00026
132	-0.01011	-10.1123	0.087756	87.75591	0.046197	46.19653	0.052818	-0.0002
133	-0.00755	-7.5496	0.085882	85.8816	0.046615	46.61472	0.05303	-0.00013
134	-0.00497	-4.9651	0.083997	83.99673	0.047012	47.01151	0.05318	-5.9E-05
135	-0.00236	-2.35978	0.082103	82.10301	0.04739	47.39012	0.053268	8.85E-06
136	0.000265	0.2651	0.080202	80.20221	0.047746	47.74589	0.053293	7.72E-05
137	0.002905	2.905312	0.078297	78.29658	0.048025	48.02482	0.053255	0.000145
138	0.005557	5.556635	0.076389	76.38886	0.048227	48.22692	0.053154	0.000214
139	0.008215	8.214849	0.074482	74.48179	0.048352	48.35226	0.052989	0.000282
140	0.010876	10.87575	0.072578	72.57807	0.048401	48.40105	0.05276	0.000349
141	0.013535	13.53513	0.07068	70.68043	0.048374	48.37358	0.052467	0.000417
142	0.016189	16.18884	0.068792	68.79156	0.04827	48.27025	0.05211	0.000484
143	0.018833	18.83272	0.066914	66.91414	0.048092	48.09155	0.05169	0.00055
144	0.021463	21.46266	0.065051	65.05082	0.047838	47.83806	0.051207	0.000616
145	0.024075	24.0746	0.063204	63.20423	0.04751	47.51048	0.050661	0.000681
146	0.026664	26.6645	0.061377	61.37696	0.04711	47.10959	0.050052	0.000746
147	0.029228	29.22837	0.059572	59.57158	0.046636	46.63628	0.049382	0.000809
148	0.031762	31.7623	0.057791	57.79061	0.046092	46.09151	0.04865	0.000872
149	0.000315	0.315485	0.056037	56.03654	0.067308	67.30845	0.047578	0.000934
150	0.036725	36.72489	0.054312	54.31179	0.044792	44.79197	0.046457	0.000994
151	0.039146	39.14601	0.052619	52.61877	0.04404	44.0396	0.045547	0.001053
152	0.041522	41.52211	0.05096	50.9598	0.043221	43.22059	0.04458	0.00111
153	0.04385	43.84959	0.049337	49.33718	0.042336	42.33636	0.043556	0.001167
154	0.046125	46.12496	0.047753	47.75312	0.041388	41.3884	0.042477	0.001222
155	0.048345	48.3448	0.04621	46.20978	0.040378	40.37832	0.041343	0.001275
156	0.050506	50.50578	0.044709	44.70927	0.039308	39.30776	0.040158	0.001327
157	0.052605	52.60468	0.043254	43.2536	0.038178	38.17848	0.038921	0.001378
158	0.054638	54.63837	0.041845	41.84473	0.036992	36.9923	0.037635	0.001427
159	0.056604	56.60383	0.040485	40.48455	0.035751	35.7511	0.0363	0.001474
160	0.058498	58.49813	0.039175	39.17484	0.034457	34.45685	0.03492	0.00152
161	0.060318	60.31847	0.037917	37.91734	0.033112	33.11158	0.033494	0.001563
162	0.062062	62.06216	0.036714	36.71368	0.031717	31.71737	0.032026	0.001605
163	0.063727	63.72664	0.035565	35.5654	0.030276	30.27638	0.030518	0.001645
164	0.065309	65.30944	0.034474	34.47397	0.028791	28.79082	0.02897	0.001683
165	0.066808	66.80825	0.033441	33.44076	0.027263	27.26295	0.027385	0.001719
166	0.068221	68.22086	0.032467	32.46703	0.025695	25.6951	0.025765	0.001753
167	0.069545	69.54521	0.031554	31.55397	0.02409	24.08964	0.024113	0.001785

168	0.070779	70.77937	0.030703	30.70265	0.022449	22.44896	0.02243	0.001814
169	0.071922	71.92152	0.029914	29.91404	0.020776	20.77554	0.020718	0.001842
170	0.07297	72.97002	0.029189	29.18901	0.019072	19.07185	0.01898	0.001867
171	0.073923	73.92333	0.028528	28.52833	0.01734	17.34044	0.017218	0.00189
172	0.07478	74.78006	0.027933	27.93264	0.015584	15.58385	0.015435	0.001911
173	0.075539	75.53899	0.027402	27.40249	0.013805	13.80468	0.013631	0.001929
174	0.076199	76.19901	0.026938	26.93831	0.012006	12.00554	0.011811	0.001945
175	0.076759	76.75916	0.02654	26.54041	0.010189	10.18906	0.009977	0.001959
176	0.077219	77.21864	0.026209	26.20899	0.008358	8.357882	0.00813	0.001971
177	0.077577	77.57679	0.025944	25.94413	0.006515	6.514673	0.006273	0.00198
178	0.077833	77.8331	0.025746	25.74579	0.004662	4.6621	0.004409	0.001986
179	0.07909	79.09039	0.025614	25.6138	0.052496	52.49649	0.001902	0.00199
180	0.078039	78.03884	0.025548	25.54787	0.00094	0.93956	-0.00058	0.001991
181	0.077988	77.98798	0.025548	25.54761	-0.00093	-0.92506	-0.00245	0.001989
182	0.077835	77.83469	0.025613	25.613	-0.00279	-2.78836	-0.00432	0.001985
183	0.077579	77.57918	0.025744	25.74447	-0.00465	-4.64766	-0.00619	0.001979
184	0.077222	77.22182	0.025942	25.94229	-0.0065	-6.5003	-0.00804	0.00197
185	0.076763	76.76312	0.026207	26.20663	-0.00834	-8.34358	-0.00989	0.001958
186	0.076204	76.20375	0.026538	26.53754	-0.01017	-10.1749	-0.01173	0.001945
187	0.075545	75.54451	0.026935	26.93493	-0.01199	-11.9915	-0.01355	0.001929
188	0.074786	74.78635	0.027399	27.39861	-0.01379	-13.7907	-0.01535	0.00191
189	0.07393	73.93037	0.027928	27.92826	-0.01557	-15.5701	-0.01713	0.00189
190	0.072978	72.97781	0.028523	28.52345	-0.01733	-17.3268	-0.01889	0.001867
191	0.07193	71.93005	0.029184	29.18365	-0.01906	-19.0584	-0.02063	0.001842
192	0.070789	70.78862	0.029908	29.9082	-0.02076	-20.7623	-0.02234	0.001814
193	0.069555	69.55518	0.030696	30.69634	-0.02244	-22.436	-0.02403	0.001785
194	0.068232	68.23153	0.031547	31.54719	-0.02408	-24.0769	-0.02568	0.001753
195	0.06682	66.8196	0.03246	32.4598	-0.02568	-25.6827	-0.0273	0.001719
196	0.065321	65.32146	0.033433	33.43308	-0.02725	-27.2508	-0.02889	0.001683
197	0.063739	63.7393	0.034466	34.46585	-0.02878	-28.779	-0.03043	0.001645
198	0.062075	62.07546	0.035557	35.55685	-0.03026	-30.2649	-0.03194	0.001606
199	0.060332	60.33238	0.036705	36.70471	-0.03171	-31.7062	-0.03341	0.001564
200	0.058513	58.51264	0.037908	37.90797	-0.0331	-33.1007	-0.03484	0.00152
201	0.056619	56.61891	0.039165	39.16507	-0.03445	-34.4464	-0.03622	0.001475
202	0.054654	54.65401	0.040474	40.47439	-0.03574	-35.741	-0.03755	0.001428
203	0.052621	52.62086	0.041834	41.83421	-0.03698	-36.9826	-0.03884	0.001379
204	0.050522	50.52247	0.043243	43.24272	-0.03817	-38.1692	-0.04008	0.001328
205	0.048362	48.36197	0.044698	44.69804	-0.0393	-39.2989	-0.04126	0.001276
206	0.046143	46.14259	0.046198	46.19823	-0.04037	-40.3699	-0.0424	0.001223
207	0.043868	43.86766	0.047741	47.74125	-0.04138	-41.3805	-0.04348	0.001168
208	0.041541	41.54059	0.049325	49.32501	-0.04233	-42.3289	-0.0445	0.001111
209	0.000361	0.360627	0.050947	50.94735	-0.01826	-18.2576	-0.04579	0.001054
210	0.036744	36.74412	0.052606	52.60604	-0.04403	-44.0331	-0.04701	0.000994
211	0.034282	34.28196	0.054299	54.29882	-0.04479	-44.786	-0.04786	0.000934
212	0.031782	31.78216	0.056023	56.02333	-0.04547	-45.4708	-0.04865	0.000872
213	0.029249	29.24851	0.057777	57.77719	-0.04609	-46.0865	-0.04938	0.000809

214	0.026685	26.68487	0.059558	59.55796	-0.04663	-46.6318	-0.05005	0.000746
215	0.024095	24.09519	0.061363	61.36316	-0.04711	-47.1057	-0.05066	0.000681
216	0.021483	21.48344	0.06319	63.19027	-0.04751	-47.5071	-0.05121	0.000616
217	0.018854	18.85366	0.065037	65.03673	-0.04784	-47.8352	-0.05169	0.00055
218	0.01621	16.2099	0.0669	66.89993	-0.04809	-48.0893	-0.05211	0.000484
219	0.013556	13.55629	0.068777	68.77726	-0.04827	-48.2685	-0.05247	0.000417
220	0.010897	10.89697	0.070666	70.66605	-0.04837	-48.3724	-0.05276	0.00035
221	0.008236	8.236105	0.072564	72.56364	-0.0484	-48.4004	-0.05299	0.000282
222	0.005578	5.577894	0.074467	74.46732	-0.04835	-48.3522	-0.05316	0.000214
223	0.002927	2.926542	0.076374	76.37439	-0.04823	-48.2274	-0.05326	0.000146
224	0.000286	0.286269	0.078282	78.28212	-0.04803	-48.0259	-0.0533	7.74E-05
225	-0.00234	-2.3387	0.080188	80.18778	-0.04775	-47.7476	-0.05328	9.09E-06
226	-0.00494	-4.94414	0.082089	82.08864	-0.04739	-47.3924	-0.05319	-5.9E-05
227	-0.00753	-7.52879	0.083982	83.98242	-0.04701	-47.0141	-0.05304	-0.00013
228	-0.01009	-10.0916	0.085867	85.86738	-0.04662	-46.6177	-0.05283	-0.0002
229	-0.01263	-12.6315	0.087742	87.74178	-0.0462	-46.1999	-0.05255	-0.00026
230	-0.01515	-15.1471	0.089604	89.60383	-0.04576	-45.7578	-0.05222	-0.00033
231	-0.01764	-17.6369	0.091452	91.45171	-0.04529	-45.2888	-0.05183	-0.0004
232	-0.0201	-20.0993	0.093284	93.28357	-0.04479	-44.7906	-0.05138	-0.00046
233	-0.02253	-22.5326	0.095098	95.0975	-0.04426	-44.2611	-0.05086	-0.00053
234	-0.02493	-24.935	0.096892	96.89163	-0.0437	-43.6987	-0.05029	-0.00059
235	-0.0273	-27.3046	0.098664	98.66401	-0.0431	-43.1017	-0.04967	-0.00066
236	-0.02964	-29.6393	0.100413	100.4127	-0.04247	-42.4689	-0.04899	-0.00072
237	-0.03194	-31.9373	0.102136	102.1359	-0.0418	-41.7991	-0.04825	-0.00078
238	-0.0342	-34.1963	0.103831	103.8315	-0.04109	-41.0915	-0.04745	-0.00085
239	-0.03693	-36.9295	0.105498	105.4977	-0.06355	-63.5488	-0.04631	-0.00091
240	-0.03859	-38.5892	0.107133	107.1326	-0.03956	-39.5604	-0.04512	-0.00096
241	-0.04072	-40.7188	0.108734	108.7343	-0.03874	-38.7357	-0.04417	-0.00102
242	-0.0428	-42.8008	0.110301	110.3009	-0.03787	-37.8713	-0.04317	-0.00108
243	-0.04483	-44.8331	0.111831	111.8307	-0.03697	-36.9673	-0.04212	-0.00113
244	-0.04681	-46.8135	0.113322	113.3217	-0.03602	-36.0237	-0.04102	-0.00119
245	-0.04874	-48.7399	0.114772	114.7724	-0.03504	-35.0409	-0.03987	-0.00124
246	-0.05061	-50.6102	0.116181	116.1809	-0.03402	-34.0193	-0.03868	-0.00129
247	-0.05242	-52.4221	0.117546	117.5457	-0.03296	-32.9595	-0.03745	-0.00134
248	-0.05417	-54.1738	0.118865	118.865	-0.03186	-31.8621	-0.03617	-0.00139
249	-0.05586	-55.8631	0.120137	120.1374	-0.03073	-30.7281	-0.03485	-0.00143
250	-0.05749	-57.4881	0.121361	121.3613	-0.02956	-29.5583	-0.03349	-0.00148
251	-0.05905	-59.0469	0.122535	122.5354	-0.02835	-28.3537	-0.03209	-0.00152
252	-0.06054	-60.5376	0.123658	123.6582	-0.02712	-27.1155	-0.03066	-0.00156
253	-0.06196	-61.9584	0.124728	124.7285	-0.02584	-25.8448	-0.02919	-0.0016
254	-0.06331	-63.3077	0.125745	125.745	-0.02454	-24.543	-0.02768	-0.00163
255	-0.06458	-64.5838	0.126707	126.7066	-0.02321	-23.2114	-0.02615	-0.00167
256	-0.06579	-65.7851	0.127612	127.6122	-0.02185	-21.8515	-0.02459	-0.0017
257	-0.06691	-66.9101	0.128461	128.4609	-0.02046	-20.4648	-0.02299	-0.00173
258	-0.06796	-67.9576	0.129252	129.2518	-0.01905	-19.053	-0.02138	-0.00176
259	-0.06893	-68.9261	0.129984	129.984	-0.01762	-17.6176	-0.01973	-0.00179

260	-0.06981	-69.8146	0.130657	130.6568	-0.01616	-16.1604	-0.01807	-0.00181
261	-0.07062	-70.6218	0.13127	131.2696	-0.01468	-14.6832	-0.01639	-0.00183
262	-0.07135	-71.3468	0.131822	131.8218	-0.01319	-13.1877	-0.01468	-0.00185
263	-0.07199	-71.9887	0.132313	132.3131	-0.01168	-11.6757	-0.01296	-0.00187
264	-0.07255	-72.5467	0.132743	132.7431	-0.01015	-10.1493	-0.01123	-0.00189
265	-0.07302	-73.02	0.133112	133.1115	-0.00861	-8.61017	-0.00948	-0.0019
266	-0.07341	-73.4082	0.133418	133.4183	-0.00706	-7.06038	-0.00773	-0.00191
267	-0.07371	-73.7106	0.133663	133.6634	-0.0055	-5.50185	-0.00596	-0.00192
268	-0.07393	-73.9271	0.133847	133.8468	-0.00394	-3.93654	-0.00419	-0.00193
269	-0.00068	-0.68191	0.133969	133.9689	-0.04956	-49.5558	-0.00181	-0.00193
270	-0.0741	-74.1008	0.13403	134.0298	-0.00079	-0.79349	0.000547	-0.00193
271	-0.07406	-74.0579	0.13403	134.03	0.000781	0.780582	0.002325	-0.00193
272	-0.07393	-73.9285	0.133969	133.9695	0.002354	2.353805	0.0041	-0.00192
273	-0.07371	-73.7127	0.133848	133.8479	0.003924	3.924203	0.005871	-0.00192
274	-0.07341	-73.4109	0.133665	133.6648	0.00549	5.489798	0.007635	-0.00191
275	-0.07302	-73.0234	0.13342	133.4202	0.007049	7.048613	0.009392	-0.0019
276	-0.07255	-72.5507	0.133114	133.1138	0.008599	8.598682	0.011138	-0.00189
277	-0.07199	-71.9933	0.132746	132.7458	0.010138	10.13805	0.012872	-0.00187
278	-0.07135	-71.3521	0.132316	132.3162	0.011665	11.66479	0.014591	-0.00185
279	-0.07063	-70.6276	0.131825	131.8254	0.013177	13.17699	0.016294	-0.00183
280	-0.06982	-69.821	0.131274	131.2735	0.014673	14.67277	0.017979	-0.00181
281	-0.06893	-68.9331	0.130661	130.6611	0.01615	16.15029	0.019643	-0.00179
282	-0.06797	-67.9651	0.129989	129.9887	0.017608	17.60774	0.021285	-0.00176
283	-0.06692	-66.9182	0.129257	129.2569	0.019043	19.04336	0.022903	-0.00173
284	-0.06579	-65.7936	0.128466	128.4664	0.020455	20.45545	0.024495	-0.0017
285	-0.06459	-64.5928	0.127618	127.6181	0.021842	21.84235	0.026059	-0.00167
286	-0.06332	-63.3172	0.126713	126.7128	0.023202	23.20246	0.027593	-0.00163
287	-0.06197	-61.9684	0.125752	125.7516	0.024534	24.53425	0.029096	-0.0016
288	-0.06055	-60.5481	0.124735	124.7354	0.025836	25.83628	0.030565	-0.00156
289	-0.05906	-59.0578	0.123665	123.6655	0.027107	27.10715	0.032	-0.00152
290	-0.0575	-57.4995	0.122543	122.543	0.028346	28.34556	0.033398	-0.00148
291	-0.05587	-55.8749	0.121369	121.3693	0.02955	29.5503	0.034758	-0.00143
292	-0.05419	-54.1861	0.120146	120.1457	0.03072	30.72026	0.036078	-0.00139
293	-0.05243	-52.4348	0.118874	118.8736	0.031854	31.85439	0.037357	-0.00134
294	-0.05062	-50.6233	0.117555	117.5546	0.032952	32.95179	0.038593	-0.00129
295	-0.04875	-48.7534	0.11619	116.1901	0.034012	34.01164	0.039785	-0.00124
296	-0.04683	-46.8275	0.114782	114.7819	0.035033	35.03325	0.040932	-0.00119
297	-0.04485	-44.8474	0.113332	113.3315	0.036016	36.01604	0.042031	-0.00113
298	-0.04282	-42.8156	0.111841	111.8407	0.03696	36.95956	0.043083	-0.00108
299	-0.04131	-41.3102	0.110311	110.3113	0.011908	11.90772	0.044418	-0.00102
300	-0.0386	-38.6049	0.108745	108.7449	0.038728	38.72772	0.04569	-0.00097
301	-0.03643	-36.4304	0.107143	107.1435	0.039552	39.55242	0.04659	-0.00091
302	-0.03421	-34.2128	0.105509	105.5088	0.040338	40.3378	0.047437	-0.00085
303	-0.03195	-31.9542	0.103843	103.8428	0.041084	41.08416	0.048231	-0.00078
304	-0.02966	-29.6566	0.102147	102.1474	0.041792	41.792	0.04897	-0.00072
305	-0.02732	-27.3222	0.100424	100.4245	0.042462	42.46202	0.049653	-0.00066

306	-0.02495	-24.953	0.098676	98.67596	0.043095	43.09508	0.05028	-0.00059
307	-0.02255	-22.551	0.096904	96.90374	0.043692	43.69227	0.05085	-0.00053
308	-0.02012	-20.1181	0.09511	95.10977	0.044255	44.25489	0.051362	-0.00046
309	-0.01766	-17.656	0.093296	93.29597	0.044784	44.78447	0.051815	-0.0004
310	-0.01517	-15.1665	0.091464	91.46425	0.045283	45.28277	0.052209	-0.00033
311	-0.01265	-12.6513	0.089616	89.61648	0.045752	45.75183	0.052542	-0.00026
312	-0.01011	-10.1117	0.087755	87.75453	0.046194	46.19395	0.052815	-0.0002
313	-0.00755	-7.54918	0.08588	85.88022	0.046612	46.61173	0.053027	-0.00013
314	-0.00496	-4.96487	0.083995	83.99534	0.047008	47.00805	0.053177	-6E-05
315	-0.00236	-2.35977	0.082102	82.10162	0.047386	47.38616	0.053265	8.1E-06
316	0.000265	0.264901	0.080201	80.20082	0.047742	47.74207	0.05329	7.64E-05
317	0.002905	2.904911	0.078295	78.29519	0.048021	48.02114	0.053252	0.000145
318	0.005556	5.55604	0.076387	76.38745	0.048223	48.22338	0.053151	0.000213
319	0.008214	8.214067	0.07448	74.48035	0.048349	48.34887	0.052986	0.000281
320	0.010875	10.87478	0.072577	72.57661	0.048398	48.3978	0.052757	0.000349
321	0.013534	13.534	0.070679	70.67894	0.04837	48.37047	0.052464	0.000416
322	0.016188	16.18754	0.06879	68.79003	0.048267	48.26727	0.052107	0.000483
323	0.018831	18.83127	0.066913	66.91256	0.048089	48.0887	0.051687	0.000549
324	0.021461	21.46106	0.065049	65.04918	0.047835	47.83535	0.051204	0.000615
325	0.024073	24.07286	0.063203	63.20253	0.047508	47.5079	0.050658	0.00068
326	0.026663	26.66262	0.061375	61.3752	0.047107	47.10714	0.050049	0.000745
327	0.029226	29.22637	0.05957	59.56974	0.046634	46.63395	0.049379	0.000808
328	0.03176	31.76017	0.057789	57.78869	0.046089	46.0893	0.048647	0.000871
329	0.000315	0.315465	0.056035	56.03453	0.067305	67.30493	0.047575	0.000933
330	0.036723	36.72254	0.05431	54.30969	0.04479	44.78999	0.046455	0.000993
331	0.039144	39.14356	0.052617	52.61657	0.044038	44.03773	0.045545	0.001052
332	0.04152	41.51956	0.050957	50.9575	0.043219	43.21882	0.044577	0.001109
333	0.043847	43.84695	0.049335	49.33476	0.042335	42.33468	0.043553	0.001166
334	0.046122	46.12223	0.047751	47.75059	0.041387	41.38682	0.042474	0.001221
335	0.048342	48.34199	0.046207	46.20713	0.040377	40.37682	0.041341	0.001274
336	0.050503	50.50289	0.044706	44.70649	0.039306	39.30635	0.040156	0.001327
337	0.052602	52.60172	0.043251	43.2507	0.038177	38.17714	0.038919	0.001377
338	0.054635	54.63534	0.041842	41.8417	0.036991	36.99103	0.037633	0.001426
339	0.056601	56.60072	0.040481	40.48138	0.03575	35.74989	0.036298	0.001473
340	0.058495	58.49496	0.039172	39.17153	0.034456	34.4557	0.034918	0.001519
341	0.060315	60.31524	0.037914	37.91389	0.03311	33.11047	0.033493	0.001562
342	0.062059	62.05888	0.03671	36.71008	0.031716	31.71631	0.032025	0.001604
343	0.063723	63.72329	0.035562	35.56165	0.030275	30.27535	0.030516	0.001644
344	0.065306	65.30604	0.03447	34.47008	0.02879	28.78981	0.028968	0.001682
345	0.066805	66.8048	0.033437	33.43671	0.027262	27.26197	0.027384	0.001718
346	0.068217	68.21736	0.032463	32.46284	0.025694	25.69413	0.025764	0.001752
347	0.069542	69.54166	0.03155	31.54962	0.024089	24.08867	0.024112	0.001784
348	0.070776	70.77576	0.030698	30.69815	0.022448	22.44799	0.022429	0.001813
349	0.071918	71.91786	0.029909	29.90939	0.020775	20.77455	0.020717	0.001841
350	0.072966	72.9663	0.029184	29.18421	0.019071	19.07085	0.018979	0.001866
351	0.07392	73.91955	0.028523	28.52337	0.017339	17.33941	0.017217	0.001889

352	0.074776	74.77623	0.027928	27.92754	0.015583	15.58278	0.015434	0.00191
353	0.075535	75.53509	0.027397	27.39725	0.013804	13.80357	0.013631	0.001928
354	0.076195	76.19505	0.026933	26.93292	0.012004	12.00438	0.011811	0.001944
355	0.076755	76.75513	0.026535	26.53489	0.010188	10.18783	0.009976	0.001958
356	0.077215	77.21454	0.026203	26.20334	0.008357	8.356588	0.008129	0.00197
357	0.077573	77.57262	0.025938	25.93835	0.006513	6.513303	0.006273	0.001979
358	0.077829	77.82884	0.02574	25.73988	0.004661	4.660646	0.004409	0.001985
359	0.079086	79.08599	0.025608	25.60778	0.052492	52.49218	0.001902	0.001989
360	0.078034	78.03441	0.025541	25.54145	0.000923	0.923398	-0.00058	0.00199

4. Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей и коэффициент жесткости при вращении стыки  $\lambda = 0.25$  - случай, используемый в диссертации.

Угол, градус	M, Нм	M, кНм	T, Н	T, кН	V, Н	V, кН	u <sub>1</sub> , м	u <sub>2</sub> , м
0	0.220865	220.8652	0.110986	110.9856	0.002946	2.94581	0.012891	6.74E-05
1	0.220724	220.7238	0.110986	110.9856	-0.00295	-2.94581	0.012903	-0.00016
2	0.220288	220.2882	0.111201	111.2014	-0.00907	-9.07404	0.012907	-0.00038
3	0.219559	219.5592	0.111621	111.6207	-0.01519	-15.1883	0.012903	-0.00061
4	0.218538	218.5377	0.112247	112.2469	-0.02128	-21.2802	0.012892	-0.00083
5	0.217225	217.2254	0.113083	113.0826	-0.02734	-27.3407	0.012873	-0.00106
6	0.215624	215.624	0.11413	114.1297	-0.03336	-33.3609	0.012846	-0.00128
7	0.213736	213.7361	0.115389	115.3895	-0.03933	-39.332	0.012811	-0.0015
8	0.211564	211.5643	0.116863	116.8626	-0.04524	-45.2449	0.012769	-0.00173
9	0.209112	209.1119	0.118549	118.5492	-0.05109	-51.0909	0.012719	-0.00195
10	0.206383	206.3826	0.120449	120.4489	-0.05686	-56.861	0.012662	-0.00217
11	0.20338	203.3803	0.122561	122.5606	-0.06255	-62.5465	0.012597	-0.00239
12	0.20011	200.1096	0.124883	124.8829	-0.06814	-68.1386	0.012524	-0.00261
13	0.196575	196.5754	0.127414	127.4139	-0.07363	-73.629	0.012445	-0.00283
14	0.192783	192.783	0.130151	130.1511	-0.07901	-79.0089	0.012358	-0.00304
15	0.188738	188.738	0.133092	133.0919	-0.08427	-84.2702	0.012264	-0.00326
16	0.184447	184.4465	0.136233	136.2328	-0.0894	-89.4045	0.012163	-0.00347
17	0.179915	179.9151	0.13957	139.5704	-0.0944	-94.4038	0.012055	-0.00368
18	0.175151	175.1506	0.143101	143.1005	-0.09926	-99.2602	0.011941	-0.00389
19	0.17016	170.1601	0.146819	146.8188	-0.10397	-103.966	0.011819	-0.00409
20	0.164951	164.9515	0.15072	150.7205	-0.10851	-108.514	0.011691	-0.0043
21	0.159532	159.5324	0.1548	154.8004	-0.1129	-112.896	0.011557	-0.0045
22	0.153911	153.9113	0.159053	159.0532	-0.1171	-117.105	0.011416	-0.0047
23	0.148097	148.0968	0.163473	163.473	-0.12113	-121.135	0.011269	-0.0049
24	0.142098	142.0978	0.168054	168.0538	-0.12498	-124.978	0.011116	-0.00509
25	0.135924	135.9236	0.172789	172.7893	-0.12863	-128.629	0.010957	-0.00529
26	0.129584	129.5836	0.177673	177.6728	-0.13208	-132.081	0.010793	-0.00547
27	0.123088	123.0878	0.182697	182.6973	-0.13533	-135.328	0.010623	-0.00566
28	0.116446	116.4463	0.187856	187.8557	-0.13836	-138.364	0.010447	-0.00584
29	0.11191	111.9097	0.193141	193.1406	-0.07117	-71.1737	0.010267	-0.00602

30	0.102768	102.7676	0.198544	198.5444	-0.14378	-143.785	0.009757	-0.0062
31	0.095752	95.75198	0.204059	204.0593	-0.14616	-146.158	0.009242	-0.00636
32	0.088633	88.63345	0.209678	209.6776	-0.1483	-148.301	0.008723	-0.00652
33	0.081423	81.42331	0.215391	215.3913	-0.15021	-150.21	0.0082	-0.00667
34	0.074133	74.133	0.221192	221.1923	-0.15188	-151.88	0.007673	-0.0068
35	0.066774	66.77416	0.227072	227.0723	-0.15331	-153.308	0.007143	-0.00693
36	0.059359	59.35856	0.233023	233.0226	-0.15449	-154.49	0.006609	-0.00705
37	0.051898	51.89813	0.239035	239.0347	-0.15542	-155.424	0.006072	-0.00716
38	0.044405	44.40492	0.2451	245.0997	-0.15611	-156.107	0.005532	-0.00726
39	0.036891	36.8911	0.251209	251.2086	-0.15654	-156.537	0.00499	-0.00735
40	0.029369	29.36892	0.257353	257.3525	-0.15671	-156.711	0.004445	-0.00743
41	0.021851	21.85072	0.263522	263.5222	-0.15663	-156.628	0.003899	-0.00751
42	0.014349	14.34889	0.269709	269.7085	-0.15629	-156.287	0.003351	-0.00757
43	0.006876	6.875893	0.275902	275.9021	-0.15569	-155.686	0.002802	-0.00762
44	-0.00056	-0.55582	0.282094	282.0937	-0.15483	-154.826	0.002252	-0.00766
45	-0.00793	-7.93374	0.288274	288.2739	-0.15371	-153.706	0.001701	-0.0077
46	-0.01525	-15.2454	0.294433	294.4334	-0.15233	-152.325	0.00115	-0.00772
47	-0.02248	-22.4784	0.300563	300.5627	-0.15069	-150.685	0.000599	-0.00773
48	-0.02962	-29.6202	0.306653	306.6525	-0.14879	-148.786	4.84E-05	-0.00774
49	-0.03666	-36.6585	0.312693	312.6935	-0.14663	-146.63	-0.0005	-0.00773
50	-0.0436	-43.5991	0.31868	318.6795	-0.14459	-144.595	-0.00105	-0.00772
51	-0.05045	-50.4467	0.324608	324.6077	-0.14266	-142.657	-0.0016	-0.00769
52	-0.0572	-57.2036	0.330475	330.4746	-0.14077	-140.768	-0.00215	-0.00766
53	-0.06387	-63.8704	0.336276	336.276	-0.13889	-138.89	-0.00269	-0.00762
54	-0.07045	-70.4459	0.342007	342.0071	-0.13699	-136.99	-0.00324	-0.00756
55	-0.07693	-76.9282	0.347663	347.6627	-0.13505	-135.046	-0.00378	-0.0075
56	-0.08331	-83.3141	0.353237	353.2373	-0.13304	-133.037	-0.00432	-0.00743
57	-0.0896	-89.5996	0.358725	358.725	-0.13095	-130.948	-0.00485	-0.00735
58	-0.09578	-95.7804	0.36412	364.1201	-0.12876	-128.765	-0.00538	-0.00726
59	-0.10185	-101.851	0.369416	369.4163	-0.12648	-126.479	-0.00591	-0.00716
60	-0.10781	-107.807	0.374608	374.6077	-0.12408	-124.081	-0.00644	-0.00705
61	-0.11364	-113.643	0.379688	379.688	-0.12157	-121.565	-0.00696	-0.00693
62	-0.11935	-119.351	0.384651	384.6513	-0.11893	-118.928	-0.00748	-0.0068
63	-0.12493	-124.927	0.389491	389.4913	-0.11617	-116.165	-0.00799	-0.00667
64	-0.13036	-130.364	0.394202	394.2023	-0.11328	-113.275	-0.0085	-0.00652
65	-0.13566	-135.657	0.398778	398.7782	-0.11026	-110.257	-0.009	-0.00637
66	-0.1408	-140.798	0.403214	403.2135	-0.10711	-107.111	-0.0095	-0.0062
67	-0.14578	-145.782	0.407503	407.5026	-0.10384	-103.837	-0.01	-0.00603
68	-0.1506	-150.603	0.41164	411.6401	-0.10044	-100.438	-0.01048	-0.00585
69	-0.15526	-155.255	0.415621	415.6209	-0.09691	-96.9148	-0.01097	-0.00566
70	-0.15973	-159.732	0.41944	419.4402	-0.09327	-93.2711	-0.01144	-0.00547
71	-0.16403	-164.029	0.423093	423.0932	-0.08951	-89.51	-0.01191	-0.00526
72	-0.16814	-168.139	0.426576	426.5756	-0.08564	-85.6355	-0.01237	-0.00505
73	-0.17206	-172.059	0.429883	429.8834	-0.08165	-81.6519	-0.01283	-0.00483
74	-0.17578	-175.782	0.433013	433.0129	-0.07756	-77.5639	-0.01328	-0.0046
75	-0.1793	-179.304	0.435961	435.9606	-0.07338	-73.3768	-0.01372	-0.00436

76	-0.18262	-182.621	0.438724	438.7236	-0.0691	-69.0959	-0.01416	-0.00411
77	-0.18573	-185.728	0.441299	441.2993	-0.06473	-64.727	-0.01458	-0.00386
78	-0.18862	-188.621	0.443686	443.6855	-0.06028	-60.2763	-0.015	-0.0036
79	-0.1913	-191.297	0.445881	445.8806	-0.05575	-55.7501	-0.01541	-0.00333
80	-0.19375	-193.752	0.447883	447.8834	-0.05115	-51.1548	-0.01582	-0.00306
81	-0.19598	-195.984	0.449693	449.6931	-0.0465	-46.4974	-0.01621	-0.00278
82	-0.19799	-197.99	0.45131	451.3099	-0.04178	-41.7846	-0.0166	-0.00249
83	-0.19977	-199.767	0.452734	452.7342	-0.03702	-37.0236	-0.01698	-0.0022
84	-0.20131	-201.314	0.453968	453.9676	-0.03222	-32.2216	-0.01735	-0.00189
85	-0.20263	-202.628	0.455012	455.0121	-0.02739	-27.3858	-0.01771	-0.00159
86	-0.20371	-203.709	0.455871	455.8708	-0.02252	-22.5237	-0.01806	-0.00127
87	-0.20456	-204.556	0.456548	456.5478	-0.01764	-17.6425	-0.0184	-0.00095
88	-0.20517	-205.168	0.457049	457.0487	-0.01275	-12.7498	-0.01873	-0.00063
89	-0.20974	-209.744	0.45738	457.3801	-0.13907	-139.07	-0.01906	-0.0003
90	-0.20569	-205.687	0.457551	457.5506	-0.00296	-2.95898	-0.01877	3.55E-05
91	-0.20559	-205.593	0.457569	457.5691	0.001953	1.953068	-0.01846	0.000362
92	-0.20526	-205.263	0.457432	457.4319	0.006876	6.876097	-0.01815	0.000683
93	-0.2047	-204.697	0.457129	457.1294	0.011803	11.80284	-0.01783	0.000999
94	-0.20389	-203.894	0.456654	456.6538	0.016726	16.72594	-0.0175	0.001309
95	-0.20286	-202.855	0.455999	455.9987	0.021638	21.63798	-0.01716	0.001613
96	-0.20158	-201.582	0.455159	455.1594	0.026532	26.53151	-0.01682	0.001911
97	-0.20007	-200.075	0.454132	454.132	0.031399	31.39911	-0.01646	0.002204
98	-0.19834	-198.335	0.452914	452.9136	0.036233	36.23339	-0.0161	0.002489
99	-0.19637	-196.366	0.451502	451.5025	0.041027	41.02704	-0.01572	0.002769
100	-0.19417	-194.169	0.449897	449.8973	0.045773	45.77285	-0.01534	0.003041
101	-0.19175	-191.747	0.448098	448.0976	0.050464	50.46371	-0.01495	0.003307
102	-0.1891	-189.102	0.446104	446.1036	0.055093	55.09269	-0.01455	0.003567
103	-0.18624	-186.239	0.443916	443.9161	0.059653	59.65301	-0.01415	0.003819
104	-0.18316	-183.16	0.441536	441.5363	0.064138	64.13811	-0.01374	0.004064
105	-0.17987	-179.87	0.438966	438.9659	0.068542	68.54165	-0.01332	0.004301
106	-0.17637	-176.373	0.436207	436.2072	0.072858	72.85754	-0.01289	0.004532
107	-0.17267	-172.673	0.433263	433.2628	0.07708	77.07998	-0.01245	0.004754
108	-0.16878	-168.775	0.430136	430.1357	0.081203	81.20348	-0.01201	0.00497
109	-0.16468	-164.685	0.426829	426.8295	0.085223	85.22288	-0.01157	0.005177
110	-0.16041	-160.406	0.423348	423.3477	0.089133	89.13342	-0.01111	0.005376
111	-0.15595	-155.945	0.419695	419.6946	0.092931	92.93074	-0.01065	0.005568
112	-0.15131	-151.308	0.415874	415.8744	0.096611	96.61094	-0.01018	0.005751
113	-0.1465	-146.5	0.411892	411.8919	0.100171	100.1706	-0.00971	0.005926
114	-0.14153	-141.527	0.407752	407.7519	0.103607	103.6068	-0.00923	0.006093
115	-0.13639	-136.395	0.40346	403.4596	0.106917	106.9174	-0.00875	0.006252
116	-0.13111	-131.11	0.39902	399.0204	0.110101	110.1007	-0.00826	0.006402
117	-0.12568	-125.678	0.39444	394.4397	0.113156	113.1559	-0.00777	0.006543
118	-0.12011	-120.106	0.389723	389.7234	0.116083	116.0828	-0.00727	0.006676
119	-0.1144	-114.4	0.384877	384.8772	0.118882	118.8824	-0.00677	0.0068
120	-0.10857	-108.565	0.379907	379.9072	0.121557	121.5566	-0.00626	0.006915
121	-0.10261	-102.608	0.374819	374.8194	0.124108	124.1083	-0.00575	0.007021

122	-0.09653	-96.5337	0.36962	369.6199	0.126542	126.542	-0.00524	0.007118
123	-0.09035	-90.3482	0.364315	364.3149	0.128864	128.8637	-0.00472	0.007207
124	-0.08406	-84.0563	0.35891	358.9105	0.131081	131.0809	-0.0042	0.007286
125	-0.07766	-77.6624	0.353413	353.4127	0.133204	133.2036	-0.00368	0.007356
126	-0.07117	-71.1707	0.347828	347.8276	0.135244	135.2441	-0.00315	0.007417
127	-0.06458	-64.5842	0.342161	342.1609	0.137218	137.2177	-0.00263	0.007468
128	-0.05791	-57.9052	0.336418	336.4183	0.139144	139.1435	-0.0021	0.007511
129	-0.05113	-51.135	0.330605	330.6049	0.141045	141.0451	-0.00157	0.007544
130	-0.04427	-44.2732	0.324726	324.7256	0.142952	142.952	-0.00103	0.007568
131	-0.03732	-37.3179	0.318785	318.7848	0.144901	144.901	-0.0005	0.007583
132	-0.03026	-30.2648	0.312786	312.7861	0.146939	146.9386	3.36E-05	0.007588
133	-0.02311	-23.1081	0.306733	306.7325	0.149097	149.097	0.000569	0.007584
134	-0.01586	-15.8602	0.30063	300.63	0.150998	150.9975	0.001104	0.00757
135	-0.00853	-8.53342	0.294488	294.488	0.152639	152.6391	0.001639	0.007547
136	-0.00114	-1.14035	0.288316	288.3158	0.154021	154.0208	0.002174	0.007515
137	0.006307	6.306545	0.282123	282.1229	0.155142	155.1424	0.002708	0.007474
138	0.013795	13.79478	0.275919	275.9186	0.156004	156.0036	0.003241	0.007423
139	0.021312	21.31187	0.269712	269.7122	0.156605	156.6047	0.003774	0.007362
140	0.028845	28.84536	0.263513	263.5132	0.156946	156.9463	0.004304	0.007293
141	0.036383	36.38283	0.257331	257.3308	0.157029	157.0295	0.004833	0.007214
142	0.043912	43.91195	0.251174	251.1743	0.156855	156.8554	0.00536	0.007126
143	0.05142	51.42045	0.245053	245.0527	0.156426	156.4257	0.005884	0.007029
144	0.058896	58.89614	0.238975	238.9752	0.155742	155.7423	0.006406	0.006922
145	0.066327	66.32698	0.232951	232.9507	0.154808	154.8077	0.006924	0.006807
146	0.073701	73.70101	0.226988	226.9879	0.153624	153.6244	0.00744	0.006682
147	0.081006	81.00645	0.221096	221.0957	0.152195	152.1954	0.007952	0.006549
148	0.088232	88.23167	0.215282	215.2825	0.150524	150.524	0.00846	0.006407
149	0.097313	97.31336	0.209557	209.5566	0.209494	209.4936	0.008964	0.006255
150	0.102396	102.3958	0.203926	203.9264	0.146469	146.4689	0.009181	0.006098
151	0.109312	109.3123	0.1984	198.3998	0.144093	144.0932	0.009395	0.005936
152	0.116104	116.1039	0.192985	192.9851	0.141492	141.4915	0.009603	0.005771
153	0.12276	122.7601	0.18769	187.69	0.138669	138.6686	0.009806	0.005603
154	0.12927	129.2704	0.182522	182.5223	0.13563	135.6295	0.010005	0.00543
155	0.135625	135.6246	0.177489	177.4893	0.13238	132.3798	0.010198	0.005255
156	0.141813	141.8131	0.172598	172.5983	0.128925	128.925	0.010385	0.005076
157	0.147826	147.8262	0.167856	167.8563	0.125271	125.2712	0.010567	0.004893
158	0.153655	153.6546	0.16327	163.2698	0.121424	121.4245	0.010744	0.004708
159	0.159289	159.2894	0.158845	158.8453	0.117391	117.3914	0.010914	0.00452
160	0.164722	164.722	0.154589	154.5889	0.113179	113.1787	0.011078	0.004328
161	0.169944	169.9442	0.150506	150.5064	0.108793	108.7933	0.011236	0.004134
162	0.174948	174.9478	0.146603	146.6033	0.104242	104.2423	0.011387	0.003937
163	0.179725	179.7255	0.142885	142.8846	0.099533	99.53301	0.011532	0.003738
164	0.18427	184.2698	0.139355	139.3554	0.094673	94.67313	0.01167	0.003536
165	0.188574	188.574	0.13602	136.0198	0.08967	89.67034	0.011802	0.003332
166	0.192632	192.6316	0.132882	132.8822	0.084533	84.53259	0.011926	0.003125
167	0.196437	196.4365	0.129946	129.9461	0.079268	79.26795	0.012044	0.002916

168	0.199983	199.983	0.127215	127.2148	0.073885	73.88468	0.012154	0.002706
169	0.203266	203.2658	0.124691	124.6913	0.068391	68.39115	0.012258	0.002493
170	0.20628	206.28	0.122378	122.378	0.062796	62.79587	0.012354	0.002279
171	0.209021	209.0212	0.120277	120.2769	0.057107	57.10745	0.012442	0.002063
172	0.211485	211.4853	0.11839	118.3895	0.051335	51.3346	0.012523	0.001845
173	0.213669	213.6687	0.116717	116.7169	0.045486	45.48613	0.012597	0.001627
174	0.215568	215.5681	0.11526	115.2596	0.039571	39.5709	0.012663	0.001407
175	0.217181	217.1808	0.114018	114.0175	0.033598	33.59782	0.012721	0.001185
176	0.218504	218.5044	0.11299	112.9903	0.027576	27.57585	0.012772	0.000963
177	0.219537	219.5371	0.112177	112.1766	0.021514	21.51397	0.012815	0.00074
178	0.220277	220.2773	0.111575	111.5747	0.015421	15.42114	0.012851	0.000517
179	0.220724	220.724	0.111182	111.1822	0.009306	9.306347	0.012878	0.000293
180	0.220877	220.8766	0.110996	110.9957	0.003179	3.178506	0.012898	6.83E-05
181	0.220735	220.7348	0.111011	111.0115	-0.00295	-2.9535	0.01291	-0.00016
182	0.220299	220.299	0.111227	111.227	-0.00908	-9.08085	0.012914	-0.00038
183	0.21957	219.5696	0.111646	111.646	-0.01519	-15.1947	0.01291	-0.00061
184	0.218548	218.5479	0.112272	112.2719	-0.02129	-21.2862	0.012899	-0.00083
185	0.217235	217.2352	0.113107	113.1072	-0.02735	-27.3464	0.01288	-0.00106
186	0.215634	215.6336	0.114154	114.1538	-0.03337	-33.3663	0.012853	-0.00128
187	0.213745	213.7454	0.115413	115.4132	-0.03934	-39.3371	0.012818	-0.0015
188	0.211573	211.5734	0.116886	116.8858	-0.04525	-45.2497	0.012776	-0.00173
189	0.209121	209.1208	0.118572	118.5719	-0.0511	-51.0954	0.012726	-0.00195
190	0.206391	206.3913	0.120471	120.4711	-0.05687	-56.8653	0.012669	-0.00217
191	0.203389	203.3888	0.122582	122.5822	-0.06255	-62.5506	0.012604	-0.00239
192	0.200118	200.1179	0.124904	124.904	-0.06814	-68.1426	0.012531	-0.00261
193	0.196584	196.5835	0.127434	127.4344	-0.07363	-73.6328	0.012452	-0.00283
194	0.192791	192.7909	0.130171	130.1711	-0.07901	-79.0127	0.012365	-0.00304
195	0.188746	188.7457	0.133111	133.1113	-0.08427	-84.2739	0.012271	-0.00326
196	0.184454	184.4541	0.136252	136.2517	-0.08941	-89.4081	0.01217	-0.00347
197	0.179922	179.9225	0.139589	139.5888	-0.09441	-94.4074	0.012062	-0.00368
198	0.175158	175.1578	0.143118	143.1183	-0.09926	-99.2638	0.011947	-0.00389
199	0.170167	170.1672	0.146836	146.8361	-0.10397	-103.97	0.011826	-0.0041
200	0.164958	164.9583	0.150737	150.7372	-0.10852	-108.517	0.011698	-0.0043
201	0.159539	159.5391	0.154817	154.8166	-0.1129	-112.899	0.011563	-0.0045
202	0.153918	153.9178	0.159069	159.0688	-0.11711	-117.109	0.011423	-0.0047
203	0.148103	148.1031	0.163488	163.4882	-0.12114	-121.139	0.011276	-0.0049
204	0.142104	142.1039	0.168069	168.0685	-0.12498	-124.983	0.011123	-0.0051
205	0.135929	135.9295	0.172804	172.8035	-0.12863	-128.633	0.010964	-0.00529
206	0.129589	129.5893	0.177686	177.6865	-0.13209	-132.086	0.010799	-0.00548
207	0.123093	123.0933	0.182711	182.7106	-0.13533	-135.333	0.010629	-0.00566
208	0.116451	116.4515	0.187869	187.8686	-0.13837	-138.37	0.010454	-0.00585
209	0.111915	111.9148	0.193153	193.1531	-0.07118	-71.1759	0.010273	-0.00603
210	0.102772	102.7723	0.198556	198.5564	-0.14379	-143.79	0.009763	-0.0062
211	0.095756	95.75635	0.204071	204.0709	-0.14616	-146.164	0.009249	-0.00637
212	0.088638	88.63752	0.209689	209.6889	-0.14831	-148.308	0.00873	-0.00652
213	0.081427	81.42707	0.215402	215.4023	-0.15022	-150.217	0.008207	-0.00667

214	0.074136	74.13643	0.221203	221.203	-0.15189	-151.887	0.007679	-0.00681
215	0.066777	66.77723	0.227083	227.0826	-0.15332	-153.315	0.007149	-0.00694
216	0.059361	59.36127	0.233033	233.0327	-0.1545	-154.498	0.006615	-0.00705
217	0.0519	51.90045	0.239045	239.0445	-0.15543	-155.432	0.006077	-0.00716
218	0.044407	44.40684	0.245109	245.1093	-0.15612	-156.116	0.005538	-0.00726
219	0.036893	36.89259	0.251218	251.2181	-0.15655	-156.546	0.004995	-0.00736
220	0.02937	29.36996	0.257362	257.3618	-0.15672	-156.72	0.004451	-0.00744
221	0.021851	21.8513	0.263531	263.5314	-0.15664	-156.638	0.003904	-0.00751
222	0.014349	14.34899	0.269718	269.7175	-0.1563	-156.297	0.003357	-0.00757
223	0.006875	6.875483	0.275911	275.911	-0.1557	-155.697	0.002807	-0.00762
224	-0.00056	-0.55675	0.282103	282.1026	-0.15484	-154.837	0.002257	-0.00767
225	-0.00794	-7.93522	0.288283	288.2827	-0.15372	-153.717	0.001707	-0.0077
226	-0.01525	-15.2475	0.294442	294.4422	-0.15234	-152.337	0.001155	-0.00772
227	-0.02248	-22.481	0.300571	300.5715	-0.1507	-150.697	0.000604	-0.00774
228	-0.02962	-29.6234	0.306661	306.6613	-0.1488	-148.799	5.33E-05	-0.00774
229	-0.03666	-36.6623	0.312702	312.7023	-0.14664	-146.643	-0.0005	-0.00774
230	-0.0436	-43.6034	0.318688	318.6883	-0.1446	-144.605	-0.00105	-0.00772
231	-0.05045	-50.4514	0.324617	324.6166	-0.14266	-142.665	-0.0016	-0.0077
232	-0.05721	-57.2086	0.330483	330.4835	-0.14077	-140.774	-0.00214	-0.00767
233	-0.06388	-63.8756	0.336285	336.2848	-0.13889	-138.894	-0.00269	-0.00762
234	-0.07045	-70.4513	0.342016	342.0159	-0.13699	-136.993	-0.00323	-0.00757
235	-0.07693	-76.9336	0.347671	347.6714	-0.13505	-135.048	-0.00377	-0.00751
236	-0.08332	-83.3195	0.353246	353.2459	-0.13304	-133.038	-0.00431	-0.00744
237	-0.08961	-89.6051	0.358734	358.7336	-0.13095	-130.948	-0.00485	-0.00735
238	-0.09579	-95.7858	0.364129	364.1286	-0.12876	-128.764	-0.00538	-0.00726
239	-0.10186	-101.857	0.369425	369.4247	-0.12648	-126.477	-0.00591	-0.00716
240	-0.10781	-107.813	0.374616	374.616	-0.12408	-124.079	-0.00644	-0.00705
241	-0.11365	-113.648	0.379696	379.6963	-0.12156	-121.563	-0.00696	-0.00694
242	-0.11936	-119.356	0.384659	384.6595	-0.11893	-118.925	-0.00748	-0.00681
243	-0.12493	-124.932	0.3895	389.4995	-0.11616	-116.162	-0.00799	-0.00667
244	-0.13037	-130.369	0.39421	394.2104	-0.11327	-113.272	-0.0085	-0.00653
245	-0.13566	-135.661	0.398786	398.7863	-0.11025	-110.254	-0.009	-0.00637
246	-0.1408	-140.803	0.403222	403.2215	-0.10711	-107.107	-0.0095	-0.00621
247	-0.14579	-145.787	0.407511	407.5106	-0.10383	-103.834	-0.00999	-0.00604
248	-0.15061	-150.607	0.411648	411.648	-0.10043	-100.434	-0.01048	-0.00586
249	-0.15526	-155.259	0.415629	415.6288	-0.09691	-96.9111	-0.01096	-0.00567
250	-0.15974	-159.736	0.419448	419.448	-0.09327	-93.2673	-0.01144	-0.00547
251	-0.16403	-164.032	0.423101	423.1009	-0.08951	-89.5062	-0.01191	-0.00527
252	-0.16814	-168.143	0.426583	426.5833	-0.08563	-85.6317	-0.01237	-0.00505
253	-0.17206	-172.062	0.429891	429.891	-0.08165	-81.648	-0.01283	-0.00483
254	-0.17578	-175.785	0.43302	433.0204	-0.07756	-77.5601	-0.01328	-0.0046
255	-0.17931	-179.307	0.435968	435.968	-0.07337	-73.3729	-0.01372	-0.00436
256	-0.18262	-182.623	0.438731	438.7309	-0.06909	-69.092	-0.01415	-0.00412
257	-0.18573	-185.73	0.441306	441.3064	-0.06472	-64.7232	-0.01458	-0.00387
258	-0.18862	-188.623	0.443692	443.6925	-0.06027	-60.2724	-0.015	-0.00361
259	-0.1913	-191.299	0.445887	445.8874	-0.05575	-55.7462	-0.01541	-0.00334

260	-0.19375	-193.754	0.44789	447.8899	-0.05115	-51.1509	-0.01582	-0.00307
261	-0.19599	-195.986	0.449699	449.6994	-0.04649	-46.4935	-0.01621	-0.00279
262	-0.19799	-197.991	0.451316	451.3158	-0.04178	-41.7807	-0.0166	-0.0025
263	-0.19977	-199.768	0.45274	452.7399	-0.03702	-37.0197	-0.01698	-0.0022
264	-0.20131	-201.315	0.453973	453.9728	-0.03222	-32.2177	-0.01735	-0.0019
265	-0.20263	-202.629	0.455017	455.0168	-0.02738	-27.3819	-0.01771	-0.00159
266	-0.20371	-203.71	0.455875	455.8749	-0.02252	-22.5197	-0.01806	-0.00128
267	-0.20456	-204.557	0.456551	456.5514	-0.01764	-17.6386	-0.0184	-0.00096
268	-0.20517	-205.169	0.457051	457.0514	-0.01275	-12.7458	-0.01873	-0.00063
269	-0.20974	-209.744	0.457382	457.3819	-0.13907	-139.066	-0.01906	-0.0003
270	-0.20569	-205.687	0.457551	457.5514	-0.00295	-2.95496	-0.01877	2.91E-05
271	-0.20559	-205.593	0.457569	457.5687	0.001957	1.957089	-0.01846	0.000356
272	-0.20526	-205.263	0.45743	457.4305	0.00688	6.880114	-0.01815	0.000677
273	-0.2047	-204.696	0.457127	457.1271	0.011807	11.80685	-0.01783	0.000993
274	-0.20389	-203.893	0.456651	456.6507	0.01673	16.72994	-0.0175	0.001303
275	-0.20285	-202.854	0.455995	455.9951	0.021642	21.64196	-0.01716	0.001607
276	-0.20158	-201.581	0.455155	455.1552	0.026535	26.53548	-0.01682	0.001905
277	-0.20007	-200.073	0.454127	454.1273	0.031403	31.40307	-0.01646	0.002197
278	-0.19833	-198.334	0.452909	452.9085	0.036237	36.23735	-0.0161	0.002483
279	-0.19636	-196.364	0.451497	451.497	0.041031	41.03099	-0.01572	0.002762
280	-0.19417	-194.167	0.449891	449.8915	0.045777	45.77679	-0.01534	0.003035
281	-0.19174	-191.745	0.448092	448.0916	0.050468	50.46765	-0.01495	0.003301
282	-0.1891	-189.1	0.446097	446.0974	0.055097	55.09663	-0.01456	0.00356
283	-0.18624	-186.236	0.44391	443.9096	0.059657	59.65695	-0.01415	0.003812
284	-0.18316	-183.158	0.44153	441.5296	0.064142	64.14205	-0.01374	0.004057
285	-0.17987	-179.867	0.438959	438.9591	0.068546	68.54559	-0.01332	0.004295
286	-0.17637	-176.37	0.4362	436.2002	0.072861	72.86148	-0.01289	0.004526
287	-0.17267	-172.67	0.433256	433.2557	0.077084	77.08391	-0.01246	0.004748
288	-0.16877	-168.772	0.430129	430.1286	0.081207	81.20739	-0.01202	0.004964
289	-0.16468	-164.681	0.426822	426.8223	0.085227	85.22677	-0.01157	0.005171
290	-0.1604	-160.402	0.42334	423.3404	0.089137	89.13728	-0.01111	0.00537
291	-0.15594	-155.941	0.419687	419.6872	0.092935	92.93456	-0.01065	0.005562
292	-0.1513	-151.304	0.415867	415.867	0.096615	96.6147	-0.01019	0.005745
293	-0.1465	-146.495	0.411884	411.8844	0.100174	100.1743	-0.00971	0.005921
294	-0.14152	-141.522	0.407744	407.7443	0.10361	103.6104	-0.00924	0.006087
295	-0.13639	-136.39	0.403452	403.452	0.106921	106.9209	-0.00875	0.006246
296	-0.1311	-131.105	0.399013	399.0127	0.110104	110.104	-0.00827	0.006396
297	-0.12567	-125.673	0.394432	394.432	0.113159	113.159	-0.00777	0.006537
298	-0.1201	-120.101	0.389716	389.7156	0.116086	116.0857	-0.00728	0.00667
299	-0.11439	-114.394	0.384869	384.8693	0.118885	118.885	-0.00677	0.006794
300	-0.10856	-108.56	0.379899	379.8993	0.121559	121.5589	-0.00627	0.006909
301	-0.1026	-102.602	0.374811	374.8114	0.12411	124.1102	-0.00576	0.007016
302	-0.09653	-96.5281	0.369612	369.6118	0.126543	126.5434	-0.00524	0.007113
303	-0.09034	-90.3426	0.364307	364.3067	0.128864	128.8644	-0.00473	0.007201
304	-0.08405	-84.0506	0.358902	358.9023	0.131081	131.081	-0.00421	0.007281
305	-0.07766	-77.6569	0.353404	353.4044	0.133203	133.2029	-0.00368	0.007351

306	-0.07117	-71.1652	0.347819	347.8193	0.135242	135.2424	-0.00316	0.007412
307	-0.06458	-64.5788	0.342153	342.1525	0.137215	137.2148	-0.00263	0.007464
308	-0.0579	-57.9001	0.33641	336.4098	0.139139	139.1392	-0.0021	0.007506
309	-0.05113	-51.1301	0.330596	330.5964	0.141039	141.0392	-0.00157	0.007539
310	-0.04427	-44.2687	0.324717	324.7171	0.142944	142.9441	-0.00104	0.007563
311	-0.03731	-37.3139	0.318776	318.7763	0.144891	144.8906	-0.00051	0.007578
312	-0.03026	-30.2615	0.312778	312.7776	0.146925	146.9253	2.87E-05	0.007583
313	-0.02311	-23.1054	0.306724	306.7241	0.149084	149.0842	0.000564	0.007579
314	-0.01586	-15.858	0.300622	300.6216	0.150985	150.9851	0.001099	0.007566
315	-0.00853	-8.53185	0.29448	294.4796	0.152627	152.6271	0.001634	0.007543
316	-0.00114	-1.13934	0.288307	288.3074	0.154009	154.0093	0.002169	0.007511
317	0.006307	6.307026	0.282114	282.1144	0.155131	155.1313	0.002703	0.00747
318	0.013795	13.79475	0.27591	275.91	0.155993	155.9929	0.003236	0.007419
319	0.021311	21.31135	0.269704	269.7035	0.156594	156.5945	0.003768	0.007359
320	0.028844	28.84436	0.263504	263.5044	0.156937	156.9365	0.004299	0.007289
321	0.036381	36.38139	0.257322	257.3219	0.15702	157.0201	0.004827	0.00721
322	0.04391	43.91008	0.251165	251.1652	0.156846	156.8464	0.005354	0.007123
323	0.051418	51.41816	0.245043	245.0434	0.156417	156.4171	0.005878	0.007025
324	0.058893	58.89347	0.238966	238.9657	0.155734	155.7342	0.0064	0.006919
325	0.066324	66.32393	0.232941	232.9409	0.1548	154.7999	0.006918	0.006804
326	0.073698	73.6976	0.226978	226.9779	0.153617	153.617	0.007434	0.006679
327	0.081003	81.00271	0.221085	221.0853	0.152188	152.1884	0.007945	0.006546
328	0.088228	88.2276	0.215272	215.2718	0.150517	150.5173	0.008453	0.006404
329	0.097309	97.3089	0.209546	209.5456	0.209484	209.4845	0.008957	0.006252
330	0.102391	102.3911	0.203915	203.915	0.146463	146.4628	0.009175	0.006095
331	0.109307	109.3074	0.198388	198.3881	0.144088	144.0875	0.009388	0.005934
332	0.116099	116.0987	0.192973	192.9729	0.141486	141.4861	0.009597	0.005769
333	0.122755	122.7546	0.187677	187.6775	0.138663	138.6634	0.0098	0.0056
334	0.129265	129.2647	0.182509	182.5093	0.135625	135.6246	0.009998	0.005428
335	0.135619	135.6187	0.177476	177.4759	0.132375	132.3751	0.010191	0.005253
336	0.141807	141.807	0.172584	172.5844	0.12892	128.9205	0.010379	0.005074
337	0.14782	147.8198	0.167842	167.8419	0.125267	125.2668	0.010561	0.004892
338	0.153648	153.6481	0.163255	163.2549	0.12142	121.4203	0.010737	0.004706
339	0.159283	159.2827	0.15883	158.8299	0.117387	117.3874	0.010907	0.004518
340	0.164715	164.7151	0.154573	154.573	0.113175	113.1748	0.011071	0.004327
341	0.169937	169.9371	0.15049	150.49	0.108789	108.7895	0.011229	0.004133
342	0.174941	174.9406	0.146586	146.5863	0.104239	104.2385	0.01138	0.003936
343	0.179718	179.718	0.142867	142.8671	0.099529	99.52934	0.011525	0.003737
344	0.184262	184.2622	0.139337	139.3373	0.094669	94.66947	0.011663	0.003535
345	0.188566	188.5662	0.136001	136.0012	0.089667	89.66668	0.011795	0.003331
346	0.192624	192.6237	0.132863	132.863	0.084529	84.52888	0.011919	0.003124
347	0.196428	196.4284	0.129926	129.9264	0.079264	79.26419	0.012037	0.002916
348	0.199975	199.9747	0.127195	127.1946	0.073881	73.88082	0.012147	0.002705
349	0.203257	203.2573	0.124671	124.6705	0.068387	68.38717	0.012251	0.002493
350	0.206271	206.2713	0.122357	122.3567	0.062792	62.79174	0.012347	0.002278
351	0.209012	209.0123	0.120255	120.255	0.057103	57.10314	0.012435	0.002063

352	0.211476	211.4762	0.118367	118.3671	0.05133	51.33009	0.012516	0.001845
353	0.213659	213.6593	0.116694	116.694	0.045481	45.48138	0.01259	0.001627
354	0.215558	215.5585	0.115236	115.2362	0.039566	39.56589	0.012656	0.001407
355	0.217171	217.1709	0.113994	113.9937	0.033593	33.59252	0.012714	0.001186
356	0.218494	218.4943	0.112966	112.966	0.02757	27.57023	0.012765	0.000964
357	0.219527	219.5267	0.112152	112.1519	0.021508	21.508	0.012808	0.000741
358	0.220267	220.2666	0.111155	111.5497	0.015415	15.4148	0.012844	0.000518
359	0.220713	220.713	0.111157	111.1568	0.0093	9.299607	0.012871	0.000294
360	0.220865	220.8652	0.110986	110.9856	0.002946	2.94581	0.012891	6.74E-05

## Приложение Б

### Метод HRM - данные, рассчитанные для обделки тоннеля под воздействием землетрясения, под углом 45°.

Случай 1: обделка тоннеля представляет собой монолит.

$u_1$  – перемещение обделки в направлении радиуса, м.

$u_2$  – перемещение обделки в тангенциальном направлении, м.

$M$  – Изгибающий момент, кНм.

$T$  – Продольная сила, кН.

Угол, градус	$M$ , Нм	$M$ , кНм	$T$ , Н	$T$ , кН	$V$ , Н	$V$ , кН	$u_1$ , м	$u_2$ , м
0	-0.0031	-3.10097	0.113044	113.044	-0.06969	-69.6871	1.31E-05	-0.00141
5	-0.02182	-21.8244	0.12663	126.6298	-0.06696	-66.9596	-0.00047	-0.00138
10	-0.03964	-39.6396	0.139714	139.7144	-0.06322	-63.2152	-0.00094	-0.00132
15	-0.05621	-56.2076	0.151954	151.9543	-0.05812	-58.1189	-0.00138	-0.00121
20	-0.07113	-71.1314	0.163003	163.0031	-0.05154	-51.5424	-0.00177	-0.00107
25	-0.08401	-84.0064	0.172537	172.5368	-0.04352	-43.5172	-0.00211	-0.0009
30	-0.09446	-94.4572	0.180274	180.2745	-0.0342	-34.1956	-0.00239	-0.0007
35	-0.10217	-102.166	0.185995	185.995	-0.02382	-23.8196	-0.00259	-0.00048
40	-0.10689	-106.891	0.189552	189.5516	-0.0127	-12.6956	-0.00271	-0.00024
45	-0.10848	-108.485	0.190883	190.8829	-0.00117	-1.1702	-0.00275	7.42E-07
50	-0.1069	-106.896	0.19	190.0001	0.010392	10.39213	-0.00271	0.000244
55	-0.10218	-102.176	0.186891	186.8905	0.021626	21.62584	-0.00259	0.00048
60	-0.09447	-94.4723	0.181597	181.5971	0.032179	32.17893	-0.00239	0.000701
65	-0.08403	-84.0258	0.17425	174.2503	0.041735	41.73509	-0.00211	0.000902
70	-0.07115	-71.1545	0.165058	165.0576	0.050037	50.03734	-0.00177	0.001075
75	-0.05623	-56.2337	0.154289	154.2891	0.056913	56.9133	-0.00138	0.001216
80	-0.03967	-39.6679	0.142262	142.2618	0.062304	62.30445	-0.00094	0.001321
85	-0.02185	-21.8538	0.129319	129.3193	0.066303	66.30335	-0.00047	0.001385
90	-0.00313	-3.13034	0.115808	115.8081	0.069208	69.20753	1.36E-05	0.001408
95	0.01617	16.16988	0.102076	102.0756	0.070517	70.51683	0.0005	0.001388
100	0.035379	35.37891	0.088571	88.57109	0.069099	69.09928	0.000973	0.001325
105	0.053763	53.76276	0.075767	75.76739	0.065061	65.06107	0.001418	0.001222
110	0.070631	70.63077	0.064107	64.10671	0.058593	58.59307	0.001822	0.001082
115	0.085358	85.35775	0.053985	53.98482	0.049964	49.96416	0.002172	0.000909
120	0.097404	97.40398	0.045736	45.73619	0.039512	39.51183	0.002457	0.000707
125	0.106332	106.3322	0.03962	39.62049	0.027631	27.63062	0.002666	0.000484
130	0.111821	111.8211	0.035811	35.81068	0.014758	14.75831	0.002795	0.000246
135	0.113674	113.6745	0.034383	34.38287	0.001361	1.360565	0.002839	1.95E-07
140	0.111827	111.8267	0.035331	35.33067	-0.01209	-12.0854	0.002795	-0.00025
145	0.106343	106.3432	0.038663	38.66331	-0.0251	-25.1016	0.002667	-0.00048
150	0.09742	97.42002	0.044325	44.32527	-0.03722	-37.2189	0.002457	-0.00071
155	0.085378	85.37825	0.052162	52.16236	-0.04799	-47.9924	0.002173	-0.00091
160	0.070655	70.65502	0.061931	61.93146	-0.05702	-57.0179	0.001823	-0.00108

165	0.05379	53.78988	0.073312	73.31215	-0.06395	-63.9452	0.001419	-0.00122
170	0.035408	35.40792	0.08592	85.91988	-0.06849	-68.491	0.000973	-0.00132
175	0.0162	16.19974	0.09932	99.3205	-0.07045	-70.4479	0.0005	-0.00139
180	-0.0031	-3.10075	0.113046	113.0461	-0.06969	-69.6923	1.42E-05	-0.00141
185	-0.02183	-21.8253	0.126632	126.6318	-0.06696	-66.9625	-0.00047	-0.00138
190	-0.03964	-39.641	0.139716	139.7163	-0.06322	-63.2162	-0.00094	-0.00132
195	-0.05621	-56.2091	0.151956	151.956	-0.05812	-58.1189	-0.00138	-0.00122
200	-0.07113	-71.1328	0.163005	163.0047	-0.05154	-51.5418	-0.00177	-0.00108
205	-0.08401	-84.0076	0.172538	172.5384	-0.04352	-43.5163	-0.00211	-0.0009
210	-0.09446	-94.4581	0.180276	180.2759	-0.03419	-34.1946	-0.00239	-0.0007
215	-0.10217	-102.166	0.185996	185.9962	-0.02382	-23.8185	-0.00259	-0.00048
220	-0.10689	-106.892	0.189552	189.5524	-0.01269	-12.6945	-0.00271	-0.00024
225	-0.10848	-108.485	0.190883	190.883	-0.00117	-1.16913	-0.00275	-5.9E-07
230	-0.1069	-106.896	0.189999	189.9994	0.010393	10.3932	-0.00271	0.000243
235	-0.10218	-102.175	0.186889	186.8894	0.021627	21.62688	-0.00259	0.000479
240	-0.09447	-94.4714	0.181596	181.5957	0.03218	32.17993	-0.00239	0.0007
245	-0.08402	-84.0247	0.174249	174.2488	0.041736	41.736	-0.00211	0.000901
250	-0.07115	-71.1532	0.165056	165.056	0.050038	50.03801	-0.00177	0.001074
255	-0.05623	-56.2322	0.154287	154.2874	0.056913	56.91349	-0.00138	0.001215
260	-0.03967	-39.6665	0.14226	142.26	0.062304	62.3037	-0.00094	0.00132
265	-0.02185	-21.8529	0.129317	129.3174	0.066301	66.3009	-0.00047	0.001384
270	-0.00313	-3.13057	0.115806	115.8061	0.069202	69.20211	1.25E-05	0.001407
275	0.016168	16.16834	0.102073	102.0734	0.070512	70.51242	0.000498	0.001387
280	0.035376	35.37631	0.088569	88.56859	0.069096	69.09583	0.000971	0.001325
285	0.053759	53.75936	0.075764	75.76429	0.065058	65.05846	0.001417	0.001222
290	0.070627	70.62677	0.064103	64.1028	0.058591	58.59115	0.001821	0.001082
295	0.085353	85.3533	0.05398	53.97995	0.049963	49.96271	0.002171	0.000908
300	0.097399	97.39918	0.04573	45.73025	0.039511	39.51062	0.002455	0.000707
305	0.106327	106.3271	0.039613	39.61344	0.027629	27.62936	0.002665	0.000484
310	0.111816	111.8155	0.035803	35.80259	0.014757	14.75672	0.002794	0.000246
315	0.113668	113.6684	0.034373	34.37349	0.001338	1.337845	0.002837	6.17E-09
320	0.111816	111.8155	0.035803	35.80259	-0.01269	-12.6945	0.002794	-0.00024
325	0.106327	106.3271	0.039613	39.61344	-0.02382	-23.8185	0.002665	-0.00048
330	0.097399	97.39918	0.04573	45.73025	-0.03419	-34.1946	0.002455	-0.0007
335	0.085353	85.3533	0.05398	53.97995	-0.04352	-43.5163	0.002171	-0.0009
340	0.070627	70.62677	0.064103	64.1028	-0.05154	-51.5418	0.001821	-0.00108
345	0.053759	53.75936	0.075764	75.76429	-0.05812	-58.1189	0.001417	-0.00122
350	0.035376	35.37631	0.088569	88.56859	-0.06322	-63.2162	0.000971	-0.00132
355	0.016168	16.16834	0.102073	102.0734	-0.06696	-66.9625	0.000498	-0.00138
360	-0.00313	-3.13057	0.115806	115.8061	-0.06969	-69.6923	1.25E-05	-0.00141

Случай 2: обделка тоннеля со стыками

$u_1$  – перемещение обделки в направлении радиуса, м

$u_2$  – перемещение обделки в тангенциальном направлении, м

$M$  – Изгибающий момент, кНм

$T$  – Продольная сила, кН

1. Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей и коэффициент жесткости при вращении стыки  $\lambda = 1.5$ .

Угол, градус	M, Нм	M, кНм	T, Н	T, кН	V, Н	V, кН	$u_1$ , м	$u_2$ , м
0	-0.00366	-3.66331	0.117055	117.0552	-0.06495	-64.9525	0.000166	-0.00183
5	-0.021	-20.9952	0.130002	130.0015	-0.06168	-61.682	-0.00047	-0.00181
10	-0.03734	-37.336	0.142411	142.4114	-0.05786	-57.8557	-0.0011	-0.00174
15	-0.05247	-52.4709	0.153982	153.9824	-0.05304	-53.04	-0.00169	-0.00162
20	-0.06608	-66.0785	0.164395	164.3947	-0.04697	-46.9733	-0.00224	-0.00144
25	-0.07781	-77.8055	0.173344	173.3441	-0.03962	-39.6215	-0.00274	-0.00122
30	-0.08732	-87.3154	0.180568	180.5678	-0.0311	-31.1039	-0.00317	-0.00096
35	-0.09432	-94.3231	0.185867	185.8666	-0.02165	-21.647	-0.00352	-0.00066
40	-0.09862	-98.6187	0.189125	189.1247	-0.01155	-11.5507	-0.00379	-0.00034
45	-0.10008	-100.083	0.190332	190.332	-0.00116	-1.16023	-0.00393	4.29E-06
50	-0.09868	-98.6773	0.189554	189.5542	0.009289	9.288608	-0.00374	0.000344
55	-0.09443	-94.4285	0.186728	186.7278	0.019515	19.5153	-0.00348	0.000663
60	-0.08746	-87.4559	0.181842	181.8419	0.029168	29.16818	-0.00313	0.000956
65	-0.07797	-77.9696	0.174995	174.9948	0.037936	37.93556	-0.00271	0.001215
70	-0.06626	-66.2553	0.166372	166.3718	0.045573	45.57311	-0.00222	0.001434
75	-0.05265	-52.6501	0.156225	156.2254	0.051936	51.93565	-0.00168	0.001608
80	-0.03751	-37.5087	0.144854	144.854	0.057019	57.01916	-0.00109	0.001732
85	-0.02115	-21.1549	0.132578	132.5778	0.061026	61.02632	-0.00047	0.001803
90	-0.00381	-3.80795	0.119706	119.706	0.064456	64.45604	0.00016	0.001819
95	0.014245	14.24546	0.106565	106.565	0.066132	66.13156	0.000794	0.00178
100	0.032317	32.31663	0.093611	93.61138	0.06513	65.13012	0.001413	0.001686
105	0.049685	49.6847	0.081312	81.31171	0.061554	61.55409	0.001978	0.001538
110	0.065671	65.67095	0.070102	70.10187	0.05559	55.58999	0.002395	0.001349
115	0.079661	79.66088	0.060374	60.37357	0.047502	47.50183	0.002755	0.001125
120	0.091124	91.12404	0.052456	52.45641	0.037622	37.62194	0.00305	0.000872
125	0.099631	99.63096	0.046603	46.60287	0.026339	26.33913	0.003269	0.000597
130	0.104866	104.8664	0.042975	42.97456	0.014085	14.08469	0.003406	0.000306
135	0.106638	106.6383	0.041629	41.62855	0.001316	1.316462	0.003457	7.18E-06
140	0.104883	104.8825	0.042534	42.53368	-0.0115	-11.4982	0.00342	-0.00029
145	0.099663	99.66349	0.045713	45.71298	-0.02389	-23.8918	0.003298	-0.00059
150	0.091173	91.17313	0.051133	51.13297	-0.0354	-35.4038	0.003093	-0.00086
155	0.079727	79.72666	0.058653	58.65262	-0.0456	-45.5966	0.002813	-0.00112
160	0.065753	65.75342	0.068037	68.03714	-0.05407	-54.0721	0.002466	-0.00135
165	0.049784	49.78363	0.078972	78.97165	-0.06049	-60.4856	0.002032	-0.00155
170	0.032432	32.4315	0.091077	91.07676	-0.06456	-64.559	0.001435	-0.0017
175	0.014375	14.37549	0.103926	103.9259	-0.06609	-66.0897	0.000808	-0.00179
180	-0.00366	-3.66382	0.117058	117.0578	-0.06496	-64.9578	0.000167	-0.00183

185	-0.021	-20.997	0.130004	130.0041	-0.06169	-61.6853	-0.00047	-0.00182
190	-0.03734	-37.3382	0.142414	142.4139	-0.05786	-57.8565	-0.0011	-0.00174
195	-0.05247	-52.4731	0.153985	153.9848	-0.05304	-53.0396	-0.00169	-0.00162
200	-0.06608	-66.0806	0.164397	164.397	-0.04697	-46.9722	-0.00224	-0.00144
205	-0.07781	-77.8072	0.173346	173.3463	-0.03962	-39.6201	-0.00274	-0.00122
210	-0.08732	-87.3167	0.18057	180.5699	-0.0311	-31.1024	-0.00317	-0.00096
215	-0.09432	-94.324	0.185868	185.8684	-0.02165	-21.6455	-0.00352	-0.00066
220	-0.09862	-98.6191	0.189126	189.1259	-0.01155	-11.5491	-0.00379	-0.00034
225	-0.10008	-100.083	0.190332	190.3322	-0.00116	-1.15861	-0.00393	2.69E-06
230	-0.09868	-98.6768	0.189553	189.5532	0.00929	9.290212	-0.00374	0.000342
235	-0.09443	-94.4276	0.186726	186.7262	0.019517	19.51688	-0.00348	0.000662
240	-0.08745	-87.4545	0.18184	181.84	0.02917	29.16971	-0.00313	0.000955
245	-0.07797	-77.9679	0.174993	174.9927	0.037937	37.93697	-0.00271	0.001214
250	-0.06625	-66.2533	0.16637	166.3696	0.045574	45.57426	-0.00222	0.001433
255	-0.05265	-52.6478	0.156223	156.223	0.051936	51.93622	-0.00168	0.001606
260	-0.03751	-37.5064	0.144852	144.8516	0.057019	57.0186	-0.00109	0.001731
265	-0.02115	-21.153	0.132575	132.5752	0.061024	61.0236	-0.00047	0.001802
270	-0.00381	-3.80743	0.119703	119.7034	0.06445	64.45049	0.000159	0.001818
275	0.014245	14.24461	0.106562	106.5623	0.066127	66.12698	0.000792	0.001779
280	0.032315	32.31467	0.093608	93.60837	0.065126	65.12645	0.001412	0.001685
285	0.049682	49.68188	0.081308	81.30812	0.061551	61.55123	0.001976	0.001538
290	0.065667	65.66745	0.070097	70.0975	0.055588	55.58776	0.002393	0.001348
295	0.079657	79.65684	0.060368	60.36825	0.0475	47.50004	0.002754	0.001125
300	0.09112	91.11954	0.05245	52.45004	0.03762	37.62035	0.003048	0.000872
305	0.099626	99.62602	0.046595	46.59542	0.026337	26.33746	0.003267	0.000597
310	0.104861	104.8609	0.042966	42.9661	0.014083	14.08265	0.003404	0.000306
315	0.106632	106.6322	0.041621	41.62068	0.001255	1.254987	0.003455	6.95E-06
320	0.104861	104.8609	0.042966	42.9661	-0.01155	-11.5491	0.003404	-0.00034
325	0.099626	99.62602	0.046595	46.59542	-0.02165	-21.6455	0.003267	-0.00066
330	0.09112	91.11954	0.05245	52.45004	-0.0311	-31.1024	0.003048	-0.00096
335	0.079657	79.65684	0.060368	60.36825	-0.03962	-39.6201	0.002754	-0.00122
340	0.065667	65.66745	0.070097	70.0975	-0.04697	-46.9722	0.002393	-0.00144
345	0.049682	49.68188	0.081308	81.30812	-0.05304	-53.0396	0.001976	-0.00162
350	0.032315	32.31467	0.093608	93.60837	-0.05786	-57.8565	0.001412	-0.00174
355	0.014245	14.24461	0.106562	106.5623	-0.06169	-61.6853	0.000792	-0.00182
360	-0.00381	-3.80743	0.119703	119.7034	-0.06496	-64.9578	0.000159	-0.00183

2. Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей и коэффициент жесткости при вращении стыки  $\lambda = 1$ .

Угол, градус	M, Нм	M, кНм	T, Н	T, кН	V, Н	V, кН	u <sub>1</sub> , м	u <sub>2</sub> , м
0	-0.00477	-4.76758	0.127258	127.258	-0.05278	-52.7841	0.000759	-0.00357
5	-0.01858	-18.5793	0.138576	138.5756	-0.04837	-48.3671	-0.00052	-0.00358
10	-0.03124	-31.24	0.149286	149.2863	-0.04462	-44.619	-0.00178	-0.00348
15	-0.0429	-42.9009	0.159204	159.2043	-0.04089	-40.885	-0.00301	-0.00327
20	-0.05341	-53.4145	0.168069	168.069	-0.03636	-36.3599	-0.00419	-0.00295
25	-0.06252	-62.5164	0.175608	175.6079	-0.03081	-30.8084	-0.00531	-0.00253
30	-0.06993	-69.9262	0.181584	181.5837	-0.02427	-24.266	-0.00635	-0.00202
35	-0.0754	-75.4	0.18583	185.8303	-0.01692	-16.922	-0.0073	-0.00142
40	-0.07876	-78.7623	0.188295	188.2951	-0.00906	-9.05696	-0.00816	-0.00074
45	-0.07992	-79.9235	0.189122	189.122	-0.001	-0.99973	-0.00863	9.8E-06
50	-0.07886	-78.8588	0.188622	188.6223	0.007128	7.128443	-0.00792	0.000737
55	-0.07557	-75.5724	0.186524	186.5239	0.015135	15.13517	-0.0071	0.001396
60	-0.07015	-70.1532	0.182638	182.6385	0.022686	22.68581	-0.00618	0.00198
65	-0.06278	-62.7766	0.176993	176.9934	0.029486	29.48575	-0.00517	0.002479
70	-0.05369	-53.6862	0.169738	169.7377	0.035322	35.32213	-0.00409	0.002887
75	-0.04316	-43.1634	0.161098	161.098	0.040119	40.11862	-0.00294	0.003198
80	-0.03147	-31.4748	0.151344	151.344	0.044033	44.03317	-0.00175	0.003406
85	-0.01877	-18.7749	0.140746	140.7461	0.047688	47.68759	-0.00052	0.003508
90	-0.00493	-4.93079	0.129508	129.5082	0.052165	52.16467	0.000714	0.003503
95	0.009893	9.893255	0.117906	117.9057	0.054763	54.76332	0.001951	0.003389
100	0.02501	25.01048	0.106397	106.3972	0.054815	54.81527	0.003167	0.003168
105	0.039734	39.73443	0.095437	95.43655	0.052414	52.41421	0.00422	0.002843
110	0.053418	53.41818	0.085446	85.44592	0.047737	47.73678	0.004721	0.002454
115	0.065476	65.47615	0.076805	76.80542	0.041036	41.03606	0.005154	0.002025
120	0.075404	75.40364	0.06983	69.83013	0.032632	32.63229	0.005511	0.00156
125	0.082793	82.79335	0.06475	64.74987	0.022901	22.90063	0.005783	0.001068
130	0.087348	87.34801	0.061686	61.68624	0.012256	12.2561	0.005964	0.000556
135	0.088888	88.88847	0.060617	60.61683	0.001135	1.13529	0.006049	3.29E-05
140	0.087356	87.35599	0.061386	61.3862	-0.01003	-10.0253	0.006038	-0.00049
145	0.082811	82.81095	0.064089	64.08932	-0.02079	-20.7926	0.00593	-0.00102
150	0.075433	75.43347	0.068795	68.79536	-0.03073	-30.7306	0.00573	-0.00152
155	0.065521	65.52123	0.075414	75.41427	-0.03942	-39.4202	0.005443	-0.00201
160	0.053482	53.4816	0.083739	83.73949	-0.04648	-46.478	0.005078	-0.00247
165	0.039819	39.81907	0.093474	93.47374	-0.05157	-51.5727	0.004499	-0.00289
170	0.025119	25.11879	0.104252	104.252	-0.05444	-54.4376	0.003286	-0.00323
175	0.010027	10.02711	0.115664	115.6639	-0.05488	-54.8805	0.002034	-0.00346
180	-0.00477	-4.77007	0.127261	127.2615	-0.05279	-52.7905	0.000761	-0.00358
185	-0.01858	-18.5834	0.138579	138.5793	-0.04837	-48.3711	-0.00052	-0.00358
190	-0.03124	-31.2444	0.14929	149.29	-0.04462	-44.6191	-0.00178	-0.00348
195	-0.04291	-42.9051	0.159208	159.2078	-0.04088	-40.8834	-0.00301	-0.00327
200	-0.05342	-53.4181	0.168073	168.0725	-0.03636	-36.3576	-0.00419	-0.00295

205	-0.06252	-62.5194	0.175611	175.6113	-0.03081	-30.8058	-0.00531	-0.00253
210	-0.06993	-69.9284	0.181587	181.587	-0.02426	-24.2634	-0.00635	-0.00202
215	-0.0754	-75.4015	0.185833	185.8333	-0.01692	-16.9193	-0.0073	-0.00142
220	-0.07876	-78.7631	0.188297	188.2973	-0.00905	-9.05419	-0.00816	-0.00074
225	-0.07992	-79.9235	0.189122	189.1223	-0.001	-0.99691	-0.00863	7.29E-06
230	-0.07886	-78.8581	0.188621	188.6206	0.007131	7.131235	-0.00792	0.000734
235	-0.07557	-75.5709	0.186521	186.5212	0.015138	15.13791	-0.0071	0.001394
240	-0.07015	-70.1509	0.182635	182.6355	0.022689	22.6885	-0.00618	0.001978
245	-0.06277	-62.7736	0.17699	176.9902	0.029488	29.48836	-0.00517	0.002477
250	-0.05368	-53.6825	0.169734	169.7344	0.035324	35.32449	-0.00409	0.002885
255	-0.04316	-43.1592	0.161095	161.0946	0.04012	40.12037	-0.00294	0.003196
260	-0.03147	-31.4703	0.151341	151.3405	0.044033	44.03348	-0.00175	0.003404
265	-0.01877	-18.7708	0.140743	140.7425	0.047685	47.68461	-0.00053	0.003507
270	-0.00493	-4.92831	0.129505	129.5048	0.052158	52.15801	0.000712	0.003501
275	0.009894	9.894057	0.117902	117.9023	0.054758	54.75755	0.001949	0.003388
280	0.02501	25.00984	0.106394	106.3936	0.05481	54.81036	0.003165	0.003167
285	0.039733	39.73257	0.095433	95.43259	0.05241	52.41007	0.004218	0.002842
290	0.053415	53.41529	0.085441	85.44132	0.047733	47.73326	0.004718	0.002454
295	0.065472	65.47236	0.0768	76.79999	0.041033	41.03296	0.005151	0.002024
300	0.075399	75.39904	0.069824	69.82376	0.032629	32.62937	0.005508	0.00156
305	0.082788	82.78794	0.064743	64.74254	0.022898	22.89765	0.00578	0.001068
310	0.087342	87.34173	0.061678	61.67804	0.012253	12.25276	0.005961	0.000557
315	0.088881	88.88117	0.060618	60.61751	0.001103	1.103395	0.006046	3.25E-05
320	0.087342	87.34173	0.061678	61.67804	-0.00905	-9.05419	0.005961	-0.00074
325	0.082788	82.78794	0.064743	64.74254	-0.01692	-16.9193	0.00578	-0.00142
330	0.075399	75.39904	0.069824	69.82376	-0.02426	-24.2634	0.005508	-0.00202
335	0.065472	65.47236	0.0768	76.79999	-0.03081	-30.8058	0.005151	-0.00253
340	0.053415	53.41529	0.085441	85.44132	-0.03636	-36.3576	0.004718	-0.00295
345	0.039733	39.73257	0.095433	95.43259	-0.04088	-40.8834	0.004218	-0.00327
350	0.02501	25.00984	0.106394	106.3936	-0.04462	-44.6191	0.003165	-0.00348
355	0.009894	9.894057	0.117902	117.9023	-0.04837	-48.3711	0.001949	-0.00358
360	-0.00493	-4.92831	0.129505	129.5048	-0.05279	-52.7905	0.000712	-0.00358

3. Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей и коэффициент жесткости при вращении стыки  $\lambda = 0.5$ .

Угол, градус	M, Нм	M, кНм	T, Н	T, кН	V, Н	V, кН	u <sub>1</sub> , м	u <sub>2</sub> , м
0	-0.00234	-2.33869	0.080186	80.18636	-0.04774	-47.7437	-0.05327	8.341E-06
5	-0.01515	-15.1463	0.089602	89.60243	-0.04576	-45.7556	-0.05222	-0.000331
10	-0.0273	-27.3033	0.098663	98.66268	-0.0431	-43.1009	-0.04967	-0.000659
15	-0.03859	-38.5879	0.107131	107.1313	-0.03956	-39.5604	-0.04512	-0.000965
20	-0.04874	-48.7387	0.114771	114.7712	-0.03504	-35.0414	-0.03987	-0.001239
25	-0.05749	-57.4871	0.12136	121.3602	-0.02956	-29.559	-0.03349	-0.001476
30	-0.06458	-64.583	0.126706	126.7056	-0.02321	-23.2122	-0.02615	-0.001668

35	-0.06981	-69.8141	0.130656	130.6559	-0.01616	-16.1614	-0.01807	-0.001811
40	-0.07302	-73.0197	0.133111	133.111	-0.00861	-8.61115	-0.00948	-0.001899
45	-0.0741	-74.1008	0.13403	134.0297	-0.00079	-0.79448	0.00055	-0.00193
50	-0.07302	-73.0237	0.133421	133.4207	0.007048	7.047637	0.009394	-0.001898
55	-0.06982	-69.8215	0.131274	131.2743	0.014672	14.67183	0.017981	-0.00181
60	-0.06459	-64.5936	0.127619	127.6191	0.021841	21.84146	0.026061	-0.001668
65	-0.0575	-57.5005	0.122544	122.5441	0.028345	28.34479	0.033401	-0.001476
70	-0.04875	-48.7546	0.116191	116.1913	0.034011	34.01109	0.039788	-0.00124
75	-0.03861	-38.6062	0.108746	108.7461	0.038728	38.72758	0.045692	-0.000965
80	-0.02732	-27.3234	0.100426	100.4258	0.042463	42.46262	0.049656	-0.000658
85	-0.01517	-15.1674	0.091466	91.46561	0.045285	45.28463	0.052212	-0.00033
90	-0.00236	-2.35978	0.082103	82.10301	0.04739	47.39012	0.053268	8.851E-06
95	0.010876	10.87575	0.072578	72.57807	0.048401	48.40105	0.05276	0.0003494
100	0.024075	24.0746	0.063204	63.20423	0.04751	47.51048	0.050661	0.0006812
105	0.036725	36.72489	0.054312	54.31179	0.044792	44.79197	0.046457	0.0009936
110	0.048345	48.3448	0.04621	46.20978	0.040378	40.37832	0.041343	0.0012754
115	0.058498	58.49813	0.039175	39.17484	0.034457	34.45685	0.03492	0.0015198
120	0.066808	66.80825	0.033441	33.44076	0.027263	27.26295	0.027385	0.0017191
125	0.07297	72.97002	0.029189	29.18901	0.019072	19.07185	0.01898	0.0018671
130	0.076759	76.75916	0.02654	26.54041	0.010189	10.18906	0.009977	0.0019591
135	0.078039	78.03884	0.025548	25.54787	0.00094	0.93956	-0.00058	0.0019911
140	0.076763	76.76312	0.026207	26.20663	-0.00834	-8.34358	-0.00989	0.0019584
145	0.072978	72.97781	0.028523	28.52345	-0.01733	-17.3268	-0.01889	0.0018668
150	0.06682	66.8196	0.03246	32.4598	-0.02568	-25.6827	-0.0273	0.0017192
155	0.058513	58.51264	0.037908	37.90797	-0.0331	-33.1007	-0.03484	0.0015203
160	0.048362	48.36197	0.044698	44.69804	-0.0393	-39.2989	-0.04126	0.0012763
165	0.036744	36.74412	0.052606	52.60604	-0.04403	-44.0331	-0.04701	0.0009944
170	0.024095	24.09519	0.061363	61.36316	-0.04711	-47.1057	-0.05066	0.0006815
175	0.010897	10.89697	0.070666	70.66605	-0.04837	-48.3724	-0.05276	0.0003497
180	-0.00234	-2.3387	0.080188	80.18778	-0.04775	-47.7476	-0.05328	9.091E-06
185	-0.01515	-15.1471	0.089604	89.60383	-0.04576	-45.7578	-0.05222	-0.00033
190	-0.0273	-27.3046	0.098664	98.66401	-0.0431	-43.1017	-0.04967	-0.000658
195	-0.03859	-38.5892	0.107133	107.1326	-0.03956	-39.5604	-0.04512	-0.000964
200	-0.04874	-48.7399	0.114772	114.7724	-0.03504	-35.0409	-0.03987	-0.001239
205	-0.05749	-57.4881	0.121361	121.3613	-0.02956	-29.5583	-0.03349	-0.001476
210	-0.06458	-64.5838	0.126707	126.7066	-0.02321	-23.2114	-0.02615	-0.001668
215	-0.06981	-69.8146	0.130657	130.6568	-0.01616	-16.1604	-0.01807	-0.001811
220	-0.07302	-73.02	0.133112	133.1115	-0.00861	-8.61017	-0.00948	-0.001899
225	-0.0741	-74.1008	0.13403	134.0298	-0.00079	-0.79349	0.000547	-0.00193
230	-0.07302	-73.0234	0.13342	133.4202	0.007049	7.048613	0.009392	-0.001898
235	-0.06982	-69.821	0.131274	131.2735	0.014673	14.67277	0.017979	-0.001811
240	-0.06459	-64.5928	0.127618	127.6181	0.021842	21.84235	0.026059	-0.001669
245	-0.0575	-57.4995	0.122543	122.543	0.028346	28.34556	0.033398	-0.001477
250	-0.04875	-48.7534	0.11619	116.1901	0.034012	34.01164	0.039785	-0.00124
255	-0.0386	-38.6049	0.108745	108.7449	0.038728	38.72772	0.04569	-0.000966
260	-0.02732	-27.3222	0.100424	100.4245	0.042462	42.46202	0.049653	-0.000659

265	-0.01517	-15.1665	0.091464	91.46425	0.045283	45.28277	0.052209	-0.000331
270	-0.00236	-2.35977	0.082102	82.10162	0.047386	47.38616	0.053265	8.1E-06
275	0.010875	10.87478	0.072577	72.57661	0.048398	48.3978	0.052757	0.0003486
280	0.024073	24.07286	0.063203	63.20253	0.047508	47.5079	0.050658	0.0006804
285	0.036723	36.72254	0.05431	54.30969	0.04479	44.78999	0.046455	0.0009927
290	0.048342	48.34199	0.046207	46.20713	0.040377	40.37682	0.041341	0.0012744
295	0.058495	58.49496	0.039172	39.17153	0.034456	34.4557	0.034918	0.0015188
300	0.066805	66.8048	0.033437	33.43671	0.027262	27.26197	0.027384	0.0017181
305	0.072966	72.9663	0.029184	29.18421	0.019071	19.07085	0.018979	0.0018661
310	0.076755	76.75513	0.026535	26.53489	0.010188	10.18783	0.009976	0.0019581
315	0.078034	78.03441	0.025541	25.54145	0.000923	0.923398	-0.00058	0.0019901
320	0.076763	76.76312	0.026207	26.20663	-0.00834	-8.34358	-0.00989	0.0019584
325	0.072978	72.97781	0.028523	28.52345	-0.01733	-17.3268	-0.01889	0.0018668
330	0.06682	66.8196	0.03246	32.4598	-0.02568	-25.6827	-0.0273	0.0017192
335	0.058513	58.51264	0.037908	37.90797	-0.0331	-33.1007	-0.03484	0.0015203
340	0.048362	48.36197	0.044698	44.69804	-0.0393	-39.2989	-0.04126	0.0012763
345	0.036744	36.74412	0.052606	52.60604	-0.04403	-44.0331	-0.04701	0.0009944
350	0.024095	24.09519	0.061363	61.36316	-0.04711	-47.1057	-0.05066	0.0006815
355	0.010897	10.89697	0.070666	70.66605	-0.04837	-48.3724	-0.05276	0.0003497
360	-0.00234	-2.3387	0.080188	80.18778	-0.04775	-47.7476	-0.05328	9.091E-06

4. Вариант при наличии стыков в обделке тоннелей и коэффициент жесткости при вращении стыки  $\lambda = 0.25$  - случай, используемый в диссертации.

Угол, градус	M, Нм	M, кНм	T, Н	T, кН	V, Н	V, кН	u <sub>1</sub> , м	u <sub>2</sub> , м
0	-0.00387	-3.86792	0.118632	118.6316	-0.06308	-63.0839	0.000236	-0.00203
5	-0.02066	-20.656	0.131327	131.3267	-0.05962	-59.6207	-0.00048	-0.00202
10	-0.03642	-36.4229	0.143473	143.4725	-0.05578	-55.7771	-0.00117	-0.00194
15	-0.05101	-51.0058	0.154783	154.7834	-0.05109	-51.0931	-0.00184	-0.00181
20	-0.06411	-64.1126	0.16495	164.9499	-0.04524	-45.2427	-0.00246	-0.00161
25	-0.07541	-75.4076	0.173674	173.6742	-0.03816	-38.1625	-0.00303	-0.00137
30	-0.08457	-84.5672	0.1807	180.6997	-0.02996	-29.9579	-0.00353	-0.00108
35	-0.09132	-91.3165	0.185834	185.8344	-0.02085	-20.8484	-0.00395	-0.00075
40	-0.09545	-95.4543	0.188974	188.9738	-0.01113	-11.1304	-0.0043	-0.00038
45	-0.09687	-96.8691	0.190129	190.1291	-0.00115	-1.14687	-0.00447	5.52E-06
50	-0.09553	-95.527	0.189392	189.3925	0.0089	8.900151	-0.00422	0.000389
55	-0.09145	-91.4473	0.186677	186.6769	0.018754	18.75362	-0.00389	0.000748
60	-0.08474	-84.7412	0.181948	181.9484	0.028064	28.06391	-0.00348	0.001074
65	-0.07561	-75.6102	0.175293	175.2932	0.036522	36.52229	-0.00299	0.00136
70	-0.06433	-64.3299	0.166889	166.889	0.04389	43.89014	-0.00243	0.001601
75	-0.05122	-51.2246	0.156982	156.9825	0.050034	50.03389	-0.00182	0.00179
80	-0.03663	-36.6318	0.145866	145.8658	0.054974	54.97358	-0.00116	0.001923
85	-0.02085	-20.8467	0.13385	133.8503	0.058964	58.96398	-0.00048	0.001998
90	-0.00404	-4.03885	0.12123	121.23	0.062575	62.57547	0.000226	0.002011

95	0.013521	13.52081	0.108324	108.3239	0.064394	64.39433	0.000929	0.001963
100	0.031141	31.14095	0.09559	95.58993	0.063556	63.55608	0.001617	0.001854
105	0.048106	48.10591	0.083492	83.49223	0.060162	60.16165	0.002237	0.001686
110	0.063742	63.74178	0.072464	72.46435	0.054396	54.39591	0.002661	0.001474
115	0.077438	77.43835	0.062896	62.89623	0.046521	46.52107	0.003028	0.001227
120	0.088669	88.66897	0.055115	55.11539	0.036867	36.86745	0.003328	0.00095
125	0.097007	97.00737	0.049371	49.37113	0.025822	25.82165	0.003552	0.00065
130	0.102141	102.1408	0.04582	45.81992	0.013812	13.81239	0.003693	0.000335
135	0.103879	103.8791	0.04451	44.50973	0.001294	1.294368	0.003748	1.03E-05
140	0.102159	102.1587	0.045397	45.39688	-0.01127	-11.2692	0.003715	-0.00031
145	0.097044	97.04351	0.048511	48.51143	-0.02342	-23.4156	0.003595	-0.00063
150	0.088724	88.72384	0.053831	53.83081	-0.03469	-34.6875	0.003392	-0.00094
155	0.077512	77.51244	0.06122	61.22018	-0.04465	-44.6504	0.003112	-0.00122
160	0.063835	63.83547	0.070449	70.44853	-0.05291	-52.9084	0.002765	-0.00148
165	0.048219	48.21933	0.081203	81.20344	-0.05912	-59.1192	0.002316	-0.0017
170	0.031274	31.27389	0.093108	93.10771	-0.06301	-63.0065	0.001648	-0.00187
175	0.013673	13.67274	0.105738	105.7376	-0.06437	-64.3693	0.00095	-0.00198
180	-0.00387	-3.86883	0.118634	118.6343	-0.06309	-63.0895	0.000237	-0.00203
185	-0.02066	-20.6582	0.131329	131.3294	-0.05962	-59.624	-0.00048	-0.00202
190	-0.03643	-36.4256	0.143475	143.4752	-0.05578	-55.7777	-0.00117	-0.00194
195	-0.05101	-51.0084	0.154786	154.786	-0.05109	-51.0925	-0.00184	-0.00181
200	-0.06411	-64.1149	0.164952	164.9523	-0.04524	-45.2414	-0.00246	-0.00162
205	-0.07541	-75.4095	0.173677	173.6765	-0.03816	-38.1609	-0.00303	-0.00137
210	-0.08457	-84.5686	0.180702	180.7019	-0.02996	-29.9562	-0.00353	-0.00108
215	-0.09132	-91.3174	0.185836	185.8363	-0.02085	-20.8466	-0.00395	-0.00075
220	-0.09545	-95.4547	0.188975	188.9751	-0.01113	-11.1286	-0.0043	-0.00039
225	-0.09687	-96.8691	0.190129	190.1293	-0.00115	-1.14508	-0.00447	3.82E-06
230	-0.09553	-95.5265	0.189391	189.3914	0.008902	8.901938	-0.00422	0.000388
235	-0.09145	-91.4463	0.186675	186.6752	0.018755	18.75538	-0.00389	0.000746
240	-0.08474	-84.7397	0.181946	181.9464	0.028066	28.06564	-0.00348	0.001072
245	-0.07561	-75.6083	0.175291	175.291	0.036524	36.52391	-0.00299	0.001359
250	-0.06433	-64.3275	0.166887	166.8867	0.043892	43.89151	-0.00243	0.001599
255	-0.05122	-51.222	0.15698	156.98	0.050035	50.03469	-0.00182	0.001788
260	-0.03663	-36.6291	0.145863	145.8633	0.054973	54.97321	-0.00116	0.001922
265	-0.02084	-20.8444	0.133848	133.8477	0.058961	58.96132	-0.00048	0.001996
270	-0.00404	-4.03794	0.121227	121.2273	0.06257	62.56969	0.000225	0.00201
275	0.01352	13.52029	0.108321	108.3212	0.06439	64.38951	0.000927	0.001962
280	0.031139	31.13925	0.095587	95.58691	0.063552	63.55217	0.001615	0.001853
285	0.048103	48.10328	0.083489	83.48866	0.060159	60.15855	0.002235	0.001686
290	0.063738	63.7384	0.07246	72.46002	0.054393	54.39346	0.002659	0.001473
295	0.077434	77.43437	0.062891	62.89098	0.046519	46.51905	0.003026	0.001226
300	0.088664	88.66448	0.055109	55.10911	0.036866	36.86563	0.003326	0.00095
305	0.097002	97.00238	0.049364	49.36379	0.02582	25.81976	0.00355	0.00065
310	0.102135	102.1353	0.045812	45.8116	0.01381	13.81014	0.003691	0.000335
315	0.103873	103.8728	0.044503	44.50295	0.001227	1.226591	0.003746	1.01E-05
320	0.102135	102.1353	0.045812	45.8116	-0.01113	-11.1286	0.003691	0.000335

325	0.097002	97.00238	0.049364	49.36379	-0.02085	-20.8466	0.00355	0.00065
330	0.088664	88.66448	0.055109	55.10911	-0.02996	-29.9562	0.003326	0.00095
335	0.077434	77.43437	0.062891	62.89098	-0.03816	-38.1609	0.003026	0.001226
340	0.063738	63.7384	0.07246	72.46002	-0.04524	-45.2414	0.002659	0.001473
345	0.048103	48.10328	0.083489	83.48866	-0.05109	-51.0925	0.002235	0.001686
350	0.031139	31.13925	0.095587	95.58691	-0.05578	-55.7777	0.001615	0.001853
355	0.01352	13.52029	0.108321	108.3212	-0.05962	-59.624	0.000927	0.001962
360	-0.00404	-4.03794	0.121227	121.2273	-0.06309	-63.0895	0.000225	0.00201