

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОСВОДЧАТЫХ СТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

PhD, доцент, **Нормуродов Шахбоз Улугбекович**

Ташкентский государственный транспортный университет

normurodovsh25@mail.ru

***Аннотация.** В данной статье рассматриваются существующие инженерные методы расчета сейсмостойкости конструкций односводчатых станций метрополитена мелкого заложения. Для проектирования туннельных сооружений было разработано несколько теорий реагирования на землетрясения, которые, как было показано, могут быть использованы для оценки состояния напряжения на нескольких станциях и сооружениях, в частности в туннелях метро.*

***Ключевые слова:** вертикальные стены, станций метрополитена мелкого заложения, сейсмостойкость, грунт, осадка, сейсмические колебания, тоннель.*

***Abstract.** This article discusses the existing engineering methods for calculating the seismic resistance of structures of single-vaulted metro stations of shallow laying. Several earthquake response theories have been developed for the design of tunnel structures, which, as it has been shown, can be used to assess the state of stress at several stations and structures, in particular in metro tunnels.*

***Keywords:** vertical walls, metro stations of shallow laying, earthquake resistance, soil, precipitate, seismic fluctuations, tunnel.*

Введение. История развития методов решения задач механики подземных сооружений насчитывающая уже более столетия, начиная с простейших схем равновесия жестких клиньев, которыми аппроксимировалась обделка сводов, включает ряд характерных этапов. При этом существенно различными темпами развивались решения двух основных подходов к расчету тоннельных обделок.

Первый подход - это имеющий значительно более давнюю предысторию, объектом непосредственного исследования является конструкция обделки, которая представляется в пространстве в виде цилиндрической, призматической

оболочки, а в плоскости в виде стержневой аппроксимации. Во втором подходе рассматривается совместность перемещений обделок тоннелей с окружающим массивом и решается контактная задача теории упругости или пластичности.

Начальным этапом в развитии теории расчёта подземных конструкций было появление способов расчета их, основанных на учете воздействия окружающего грунта исключительно как нагрузки, пренебрегая влиянием его как упругой среды. Монолитная каменная или бетонная обделка рассматривалась как упругий свод, находящийся под воздействием только активного давления грунта; реакция породы при этом не учитывалась. Дальнейшее развитие теория подземных конструкций получила в работах О. Коммереля, С. Н. Розанова и Б. Хьюита. Новое здесь заключалось в учете влияния грунта как среды, помогающей в работе конструкции, а именно, в учете реактивного воздействия породы по боковым плоскостям обделки [1].

Материалы и методы. Расчетная схема монолитной конструкции предусматривала отдельное рассмотрение свода и стен без учета влияния их совместных деформаций. Свод рассчитывался как бесшарнирный на неподвижных опорах. Вне зависимости от характеристик конструкции и грунта, стенки обделки рассматривались как жесткие и неподвижные, что снижало достоверность расчета не в запас прочности. Способы О. Коммереля, С.Н. Розанова и Б. Хьюита переоценивали влияние поддерживающих сил реактивного воздействия грунта и тем самым приводили к недостаточно надежным результатам. В целях компенсации указанных допущений при расчете обделок повышали значения коэффициента запаса прочности конструкции, принимая его равным 4 и более; проектирование подземных конструкций вели, главным образом, копируя построенные ранее сооружения, что в конечном счете значительно увеличивало стоимость строительства. Дальнейшее развитие теория расчёта подземных конструкций получила в работах ученых и инженеров, решивших задачу о расчете обделки как упругой системы в упругой среде.

Первое предположение о расчете монолитной подземной конструкции как единой статически неопределимой системы было сделано С.С. Давыдовым в 1934-1935 гг. [2-4]. В основу решения было положено допущение, что упругая среда подчиняется линейной зависимости между напряжениями и осадками, т. е. гипотезе Винклера. Обделка рассматривалась как конструкция с гибким сводом и абсолютно жесткими стенами. На своде предполагалось отсутствие упругого отпора. Задача была решена для общего случая расположения обделки в разнородном грунте.

Для облегчения расчета разными авторами: А.М. Новиковым, К.А. Вахуркиным, В.С. Эристовым, Л.И. Гореликом, Г.К. Клейном, М. Шпрэнгелом, М. Друкером и другими был разработан ряд так называемых приближенных методов расчета обделок, которые основывались на априорном задании вида эпюр упругого отпора. При определении отпора пород все авторы приближенных методик исходили из гипотезы Винклера, а максимальные ординаты эпюр отпора определялись из условия совместности деформаций обделки и пород в точке, лежащей на горизонтальном диаметре. Наибольшее распространение получил предложенный О.Е. Бугаевой метод расчета тоннельных обделок, основанный на представлении эпюры упругого отпора в виде плавной кривой заданного очертания [3-5]. Отпор учитывался на той части контура обделки, которая при деформации получает перемещения в сторону породы, величина отпора в любой точке принималась пропорциональной перемещению в этой точке и направленной перпендикулярно к поверхности обделки. На всем участке действия сил отпора учитывались также силы трения.

Эпюра отпора определялась тремя точками: двумя нулевыми и точкой с максимальной ординатой. Нижняя нулевая точка принималась в пяте свода, так как пяты подъемистых сводов, согласно общепринятой гипотезе, горизонтальных смещений не получают. Верхняя нулевая точка принималась по опыту проектирования лежащей в сечении, наклоненном под углом 45 либо, для обделок очертания верхней части, которых сильно отличается от полуциркульного, в сечении, где пролет в свету составляет 0,7 от максимального пролета. Обделка рассчитывалась как свод с упруго заделанными пятами по методу сил. Задача о расчете круговой обделки как кольца в упругой среде, подчиняющейся гипотезе Винклера, была решена инженерами Мосметростройпроекта Б.П. Бодровым, Л.И. Гореликом, С.Г. Полярковым, Б.Ф. Матэри и В.М. Разнощиком (рис.1). В работах [2] реакция упругого основания принималась пропорциональной радиальным деформациям точек контура обделки, выражаемым посредством тригонометрического ряда. Задача решалась методом последовательных приближений, пока все участки, где вычислялась упругая энергия породы, не совпадут с зонами действия сжимающего упругого отпора. По полученным перемещениям определялись усилия в обделке.

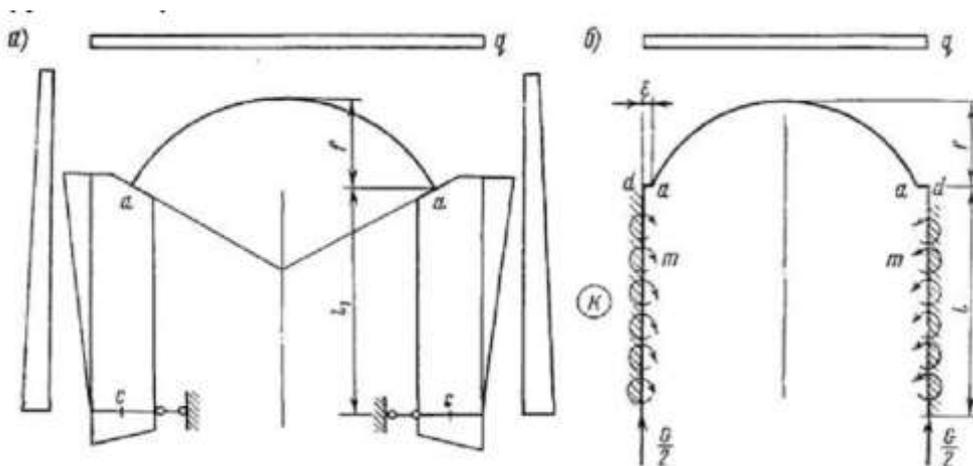


Рис. 1. Схема расчета «пологий свод, опирающийся на вертикальные стены»

Наибольшее распространение и практическое применение как в нашей стране, так и за рубежом нашел метод расчета Б. П. Бодрова и Б. Ф. Матэри [5], позволяющий рассчитывать обделки произвольного очертания. Для упрощения решения ось обделки заменяется стержневым многоугольником, причем внешние нагрузки и упругие реакции предполагаются сосредоточенными в его вершинах. Н.Н. Шапошников предложил применять способ Метрогипротранса в форме метода перемещений [6]. При этом количество неизвестных возрастает, примерно, в три раза, но существенно стандартизируется алгоритм расчета, что облегчает составление программ для ЭВМ. Для облегчения построения матриц реакций упругие опоры полагаются расположенными перпендикулярно стержням, т. е. в каждом узле по две опоры (рис.2, 3).

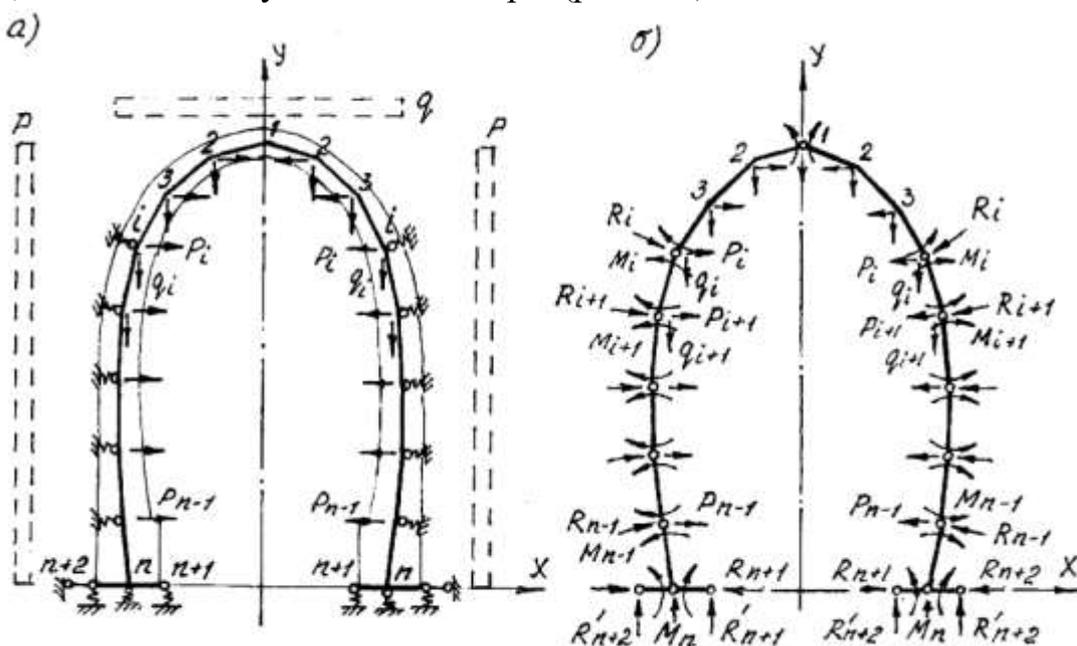


Рис.2. Расчетная схема сводчатых конструкций тоннелей по методу упругого отпора породы

С. С. Давыдов разработал и изложил в монографии [7] метод расчета подземных конструкций, в котором отказался от применения гипотезы Винклера, воспользовавшись решениями теории упругости. По этой методике подземная конструкция рассматривается как упругая статически неопределимая система, на которую оказывает воздействие грунт и как нагрузка и как упругая среда (рис.3).

Отпор породы при расчете монолитных конструкций учитывается только в пределах стены, которая рассматривается или жесткой, или упругой. Воздействие породы на стенку учитывается системой стерженьков, связанных с упругим слоем, по аналогии со способом расчета балок на упругом основании, предложенным Б. Н. Жемочкиным.

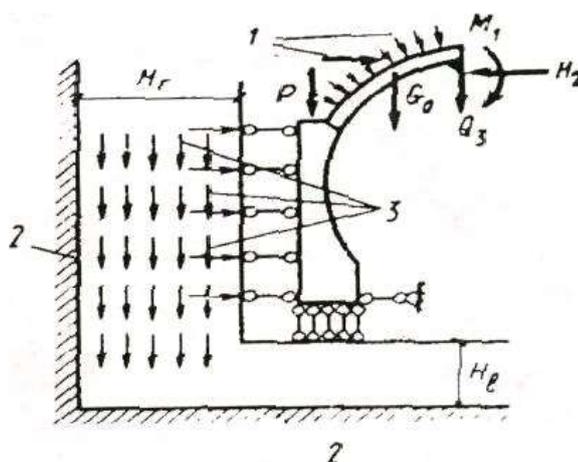


Рис. 3. Расчетная схема сводчатых конструкций тоннелей по С. С. Давыдову

Количество стерженьков изменяется в зависимости от требуемой точности расчета и обычно равняется пяти. Расчет конструкции по методике С.С. Давыдова производился смешанным методом в точке “А” вводились добавочные связи, препятствующие повороту и вертикальному смещению. Таким образом, учитывалась только величина равнодействующей сил трения, пренебрегая характером их распределения на основании анализа величин контактных напряжений между обделкой и породой, замеренных в натуральных условиях, Н.С. Булычев предложил экспериментально-теоретический метод расчета тоннельных обделок [8]. При неуравновешенности системы нормальных контактных напряжений касательные напряжения являются следствием и своеобразной реакцией пород на неравномерность радиальных нагрузок. Для их определения использовалась схема Метрогипротранса, в которой опоры (жесткие или упругие) поставлены по касательной к обделке, а в качестве

нагрузки используются замеренные величины нормальных контактных напряжений.

С началом широкого внедрения в расчетную практику ЭВМ методика Метрогипротранса стала развиваться. Оказалось, возможным уточнения условий контакта на основе введения в рассмотрение упругих стержней, моделирующие отпорные свойства массива [9]. В настоящее время разработаны и эксплуатируются большое количество программ для ПЭВМ, реализующих различные модификации методики Метрогипротранса. К сожалению, все описанные методы расчета основываются на гипотезе Винклера, которая имеет существенные недостатки, связанные с не учетом распределительной способности породного массива (грунта) и с неопределенностью величины коэффициента упругого отпора, который не является физико-механической константой грунта, а зависит от множество факторов, например, от площади опирания и интенсивности нагрузки. При расчете замкнутой монолитной выработки некругового сечения рассматривается плоская контактная задача теории упругости о равновесии кольца произвольной формы с одной осью симметрии, подкрепляющего вырез в упругой весомой полуплоскости. Постановка и решение задачи принадлежат Н.Н. Фотиевой, К.В. Руппенейт на основе предположения о гидростатическом бытовом напряженном состоянии массива рассмотрел осесимметричную задачу взаимодействия горного массива с кольцевой обделкой. Согласно теории К.В. Руппенейта при проведении выработки в окрестности ее в окружающем породном массиве происходит перераспределение напряжений, точки контура выработки получают упругие смещения внутрь выработки.

Поскольку горные породы имеют ограниченную прочность, в местах концентрации напряжений начинают развиваться неупругие деформации, охватывающие некоторую область.

Интересные результаты по расчету на сейсмостойкость тоннелей мелкого заложения получены Н.Н. Фотиевой, Н.С. Булычевым [9] и др. на основе рассмотрения квазистатических задач теории упругости для среды, ослабленной неподкрепленными или подкрепленными отверстиями, испытывающей не бесконечности двухосное сжатие или чистый сдвиг, моделирующие соответственно действию длинных (более, чем в 3 раза превосходящих размеры отверстий) продольных и поперечных волн произвольного направления.

Результаты и их обсуждение. Нагрузки на обделку определяют отдельно для вертикального и горизонтального направлений сейсмических воздействий:

а) горизонтальную и вертикальную составляющие сейсмической нагрузки от

собственного веса обделки вычисляют по формуле

$$S_k = Q_k k_c \quad (1.1)$$

где Q - вес элемента обделки, отнесенный к точке k ;

б) интенсивность горизонтального инерционного давления грунта на обделку в пределах высоты стены обделки определяют по формуле

$$p_{(y)} = p_y k_c \lg \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (1.2)$$

где p_y - активное давление грунта, кгс/см²;

и) горизонтальную составляющую инерционной массы грунта засыпки над тоннелем в пределах пролета выработки, приложенную к верхней части обделки, определяют по формуле

$$P_c = g H l f, \quad (1.3)$$

где l - ширина выработки, м;

H - расстояние от дневной поверхности, м;

f - коэффициент трения грунта по обделке.

г) интенсивность вертикальной составляющей $q_c^{свм}$ определяют по формулам

$$q_c^{свм} = \gamma H k_c \quad (\text{от веса полного столба } H_{\text{грунта}} \text{ над тоннелем})$$

или

$$q_c^{свм} = \gamma h_1 k_c \quad (\text{при возможности сводообразования, где } h_1 - \text{высота свода}).$$

Производится раздельное суммирование горизонтальных сил от собственного веса и инерционных масс грунта (первое сочетание) и вертикальных нагрузок от собственного веса и инерционных масс грунта (второе сочетание), выполняется два статических расчета по первому и второму сочетанию и проверяется прочность сечений обделки.

Исследования, проведенные Ш.И. Айтиалиевым, Ж.К. Масановым и других учёных также посвящены изучению квазистатической работы тоннельной обделки при сейсмических воздействиях с учетом анизотропии массива и дифракции волн.

Ташкентский метрополитен возводилось в сложных инженерно-геологических и сейсмологических условиях. Впервые в практике метростроения пришлось решать задачи сейсмостойкости конструкций станций и перегонных тоннелей, проходящих в сильно увлажненных лессовых породах. Город расположен в районе с расчетной сейсмичностью, равной 9 баллам, поэтому конструкции станций и перегонных тоннелей, выполненные из сборного и монолитного железобетона, необходимо было рассчитать не только на восприятие постоянных и временных нагрузок, но и на действие инерционных

сил движения породы в момент землетрясения. Большая часть района трассы представлена лессовидными суглинками, отличительная особенность которых - высокая просадочность. События условия района строительства (высокая расчетная сейсмичность, просадочные грунты, сухой жаркий климат) существенно повлияли на инженерные решения.

Определяющим оказалось обеспечение сейсмостойкости и непросадочности конструкций. При выборе расчетных схем приняты конструкции с жесткими узлами сопряжений элементов в уровнях перекрытия и лотка. При этом большую роль сыграли динамические методы расчета тоннелей метрополитена, взаимодействующих с грунтом труды узбекских ученых Т.Р. Рашидова, Г.Х. Хожметова и А.А. Ишанходжаева [7, 8].

Таким образом, в настоящее время разработаны несколько теорий по расчетным схемам, которых, могут оцениваться напряженно-деформированное состояние конструкций станций односводчатого типов, в частности тоннелей метрополитена мелкого заложения:

Спектральная теория сейсмостойкости подземных сооружений.

Согласно этой теории инерционное сейсмическое давление на сооружение определяется от собственного веса самого сооружения и веса взаимодействующего некоторого слоя грунта. При этом сейсмические силы от грунта вычисляются через нормативные давления грунта произведением на понижающий коэффициент, учитывающий сейсмичность района строительства. Сейсмические силы, возникающие от веса конструкции определяются согласно спектральному методу расчета, которые заложены в нормах. Достоинством этой теории является, то, что при длинноволновом сейсмическом воздействии предлагается упрощенная схема вычисления сейсмической нагрузки и учет динамических характеристик самого сооружения в зависимости от ее формы колебания. Недостатком является, что расчет производится в предположении их статического действия, и вычисляемые нагрузки прикладываются статически к сооружению.

Квазистатическая теория сейсмостойкости подземных сооружений.

Согласно этой теории сейсмические волны отличаются большой длиной, существенно превышающей размеры поперечных сечений тоннелей, вследствие чего задача расчета подземных сооружений на сейсмостойкость сводится к решению квазистатических задач применительно к сейсмическим волнам, приложенных на бесконечности [9]. Нагрузки на сооружения определяются через жесткостные характеристики окружающего тоннель породного массива грунта.

Достоинством этой теории является, как и в первом, упрощенная схема вычисления сейсмической нагрузки на сооружение. Недостатком является невозможность распространения расчетных схем для произвольных очертаний тоннельных конструкций и не учет инерционных свойств самого сооружения.

Динамическая теория сейсмостойкости подземных сооружений.

Согласно этой теории расчет тоннельной обделки может производиться по сейсמודинамической теории подземных сооружений и по теории волновой динамики [10]. В первом случае расчет основан в прямых динамических методов расчета, заключающееся в исследовании колебаний элементов обделки, взаимодействующих с грунтом и составлении дифференциальных уравнений колебания тоннельного сооружения, а во втором с учетом дифракции упругих сейсмических волн, учитывающих многократных преломлений и отражений на отверстиях образованными тоннельными сооружениями.

Достоинством динамической теории по сравнению двум первым является учет в расчетах действительных колебательных стационарных и волновых нестационарных процессов в грунте и в сооружении и изменение получаемых внешних и внутренних усилий во времени.

Заключение. Целью работы является изучение состояния односводчатых станций тоннелей метрополитена и исследование их напряженно-деформированного состояния с учетом совместного действия сейсмических волн сжатия (растяжения) и сдвига.

При этом представляется выполнить следующие задачи:

- анализ условий работы и изменений напряженно-деформированного состояния элементов односводчатых станций тоннелей метрополитен мелкого заложения а при воздействии сейсмических волн;
- разработка моделей деформирования конструкций односводчатых станций тоннелей метрополитена мелкого заложения с использованием методов строительной механики и механики грунтов при сейсмических воздействиях;
- разработка методик расчета конструкций односводчатых станций тоннелей метрополитена мелкого заложения с учетом совместного действия сейсмических волн сжатия (растяжения) и сдвига, проведение численных расчетов и исследование влияния грунтовой среды на изменение несущей способности и работоспособности элементов конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамсон В.М., Закиров А.З., Муравин П.И. Автодорожный тоннель на трассе Краснопресненского проспекта от МКАД до проспекта Маршала Жукова // Метро и тоннели. - 2003. - № 3. - С. 22-25.
2. Никольский Б.В. Тоннели третьего кольца - крупнейшие подземные сооружения Москвы // Метро и тоннели. - 2001. - № 2. - С. 2-5.
3. Черняков А.В. Опыт строительства обхода Лефортово по тоннельно-эстакадному варианту // Метро и тоннели. - 2003. - № 5. - С. 10-15.
4. Быкова, Н.М. Протяженные транспортные сооружения на активных геоструктурах. Технология системного подхода / Н.М. Быкова. – Новосибирск: Наука, 2008. – 212 с.
5. Miralimov, M. X., & Normurodov, S. U. (2019). CONSTRUCTION FEATURES OF TRANSPORT TUNNELS IN THE MOUNTAIN AREAS OF UZBEKISTAN. Journal of Tashkent Institute of Railway Engineers, 15(3), 26-35.
6. Miralimov, M. X., & Normurodov, S. U. (2022). BIR IZLI METROPOLITEN TONNEL QOPLAMASI HISOBI. PEDAGOGS jurnali, 2(2), 92-94.
7. Нормуродов, Ш. У. (2022). ТОННЕЛАРНИ ҚУРИШ БИЛАН БОҒЛИҚ ДЕФОРМАЦИОН ЖАРАЁНЛАРНИ АНИҚЛАШ МАСАЛАЛАРИ. Academic research in educational sciences, 3(10), 447-460.
8. Miralimov, M., Normurodov, S., Akhmadjonov, M., & Karshiboev, A. (2021). Numerical approach for structural analysis of Metro tunnel station. In E3S Web of Conferences (Vol. 264, p. 02054). EDP Sciences.
9. Ишанходжаев А. А., Миралимов М. Х., Махмуд А. Х. Исследование и разработка сейсмостойких конструкций станций метрополитенов из сборных элементов. Материалы 20 конф. професс. препод. состава, ТАДИ, Часть 3, 1994, с.26
10. Основы теории расчета и конструирования. Железобетонные конструкции // Под ред. Т. М. Пецольда и В. В. Тура, Брест, 2004, - 380 с.