

Моделирование возведения подводного тоннеля метрополитена

С.Е. Соколова, Я.А. Богданов, А.В. Манько, Е.А. Муравьева

Московский государственный строительный университет

Аннотация: Статья посвящена математическому моделированию строительства подводных тоннелей, предназначенных для метрополитена. Данный тип тоннелей также можно использовать как железнодорожный и автодорожный. Самыми интересными являются подводные тоннели-мосты и плавающие тоннели, но самые перспективные и наиболее часто встречающийся это тоннели, расположенные на дне водной преграды.

Ключевые слова: подводный тоннель, метрополитен, метод конечных элементов, метод отпусковых секций, математическое моделирование, этапы технологии строительства, транспортный тоннель, напряженно-деформированное состояние.

Подводные тоннели – это транспортные сооружения, проложенные через водные преграды. Различают четыре варианта строительства тоннеля, которые отличаются также конструктивно [1]:

- под дном водной преграды,
- погружен на дно водной преграды,
- погружной плавающий тоннель,
- тоннели-мосты (погружные тоннели на опорах).

Первый тип подводных тоннелей являются классическими тоннелями, проложенными в грунте под дном на какой-либо глубине. Таких тоннелей построено во всем мире очень много [2]. Следующий по частоте применения это подводные тоннели, погруженные на дно водной преграды. У этого варианта есть различные виды технологии устройства, но в основном всё сводится к двум [3]:

1. Устройство подводного разреза (траншеи), в котором монтируют тоннель из готовых отсеков, а после засыпают траншею и тоннель каменным материалом;

2. Монтаж тоннеля из готовых отсеков на выровненную постель и после засыпка тоннеля послойно песком и каменным материалом.

В мире также возводятся подводные тоннели. А особенно преуспели в подводном тоннелестроении Норвегия и Китай [4, 5].

Для данного исследования был выбран подводный тоннель в траншее на дне водной преграды (реки Енисей), который впоследствии необходимо засыпать каменным материалом. Причина такого выбора в том, чтобы не уменьшать габарит судового хода потому, что река Енисей в данном районе судоходна и глубина составляет 25м. Длина подводной части, состоящей из секций – 740м.

Обычно секции проектируют так, чтобы в законченном виде они имели хотя бы небольшую отрицательную плавучесть, гарантирующую от необходимости принятия мер против всплытия тоннеля. Однако, в этом случае, приходится для удержания секций на плаву соединять их с понтонами или, для секций круговой формы, заполнять лишь частично пространство между стальными оболочками бетоном до спуска на воду. Такой процесс продолжается в плавучем состоянии секции, а заканчивается только после ее доставки на место опускания [6].

При помощи землесосного снаряда улучшенной конструкции [7] производится выемка (разрез, траншея) с отвозом лишнего грунта и придонного ила на утилизацию на специализированных полигонах. Секции подводного тоннеля изготавливают на берегу в сухих доках и буксируют к месту монтажа баржами также, как и при устройстве причальных или берегозащитных сооружений из массив-гигантов [8]. После затопления секции сверху на нее идет каменная наброска и откачка воды.

Выбор трассы подводного тоннеля должен вестись не только с точки зрения транспортной эффективности и целесообразности, но и с точки зрения соответствия инженерно-геологических особенностей выбранной трассы поставленным задачам. Геология по правому берегу следующая: насыпной грунт в виде галечникового грунта с песчаным заполнителем с прослоями

суглинка с галькой; галечниковый грунт с песчаным заполнителем, маловлажный; галечниковый грунт с песчаным заполнителем водонасыщенный; суглинок элювиальный тверды, непросадочный, ненабухающий. Тоннель будет проходить в последнем грунте. Начиная с момента геологических изысканий, необходимо устраивать систему геомеханического мониторинга за окружающей средой [9].

Для моделирования поставленной задачи использовался метод конечных элементов. Один из самых распространенных программных комплексов, широко применяемый в инженерной практике – PLAXIS 2D [10]. В процессе расчета была использована модель среды Мора–Кулона. Расчеты выполнены по I группе предельных состояний с обеспеченностью 0,95. На рис.1 показана типовая конструкция тоннеля, которая используется в данном исследовании.

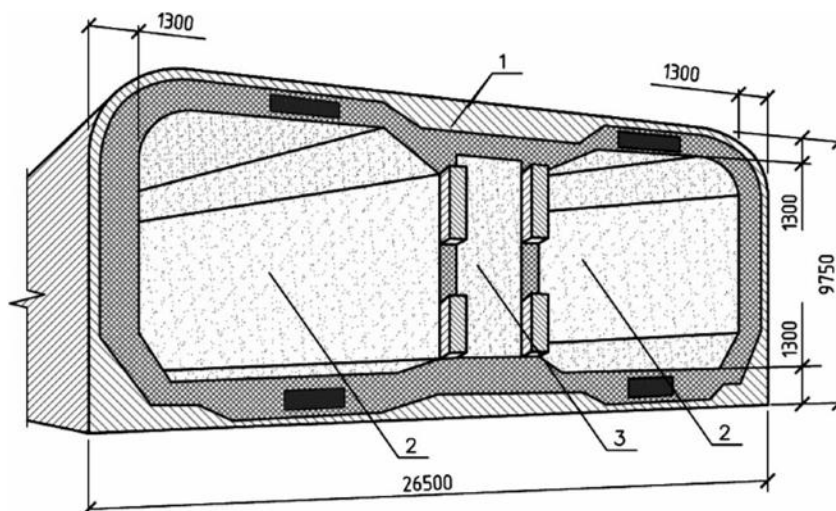


Рис.1. – Поперечный разрез подводного тоннеля: 1 – каменно-грунтовая постель тоннеля, 2 – двухпутный транспортный тоннель, 3 – сервисный тоннель.

При проведении моделирования были моделированы шесть этапов производства работ:

- Моделирование природного напряженно-деформированного состояния (НДС) геологической среды рассматриваемого участка строительства.

- Подготовка дна основания, устройство землесосом траншеи.
- Погружение секции, стыковка с предыдущей секцией.
- Обратная засыпка песчано-каменным материалом.
- Откачивание воды из секции.
- Открытие гермоворот, устройство железнодорожного пути и дальнейшая эксплуатация.

На рис. 2 показаны деформации грунтового массива дна реки в процессе возведения подводной траншеи. Максимальная деформация составит 2,8 см на дне траншеи и 2 см в ее откосах.

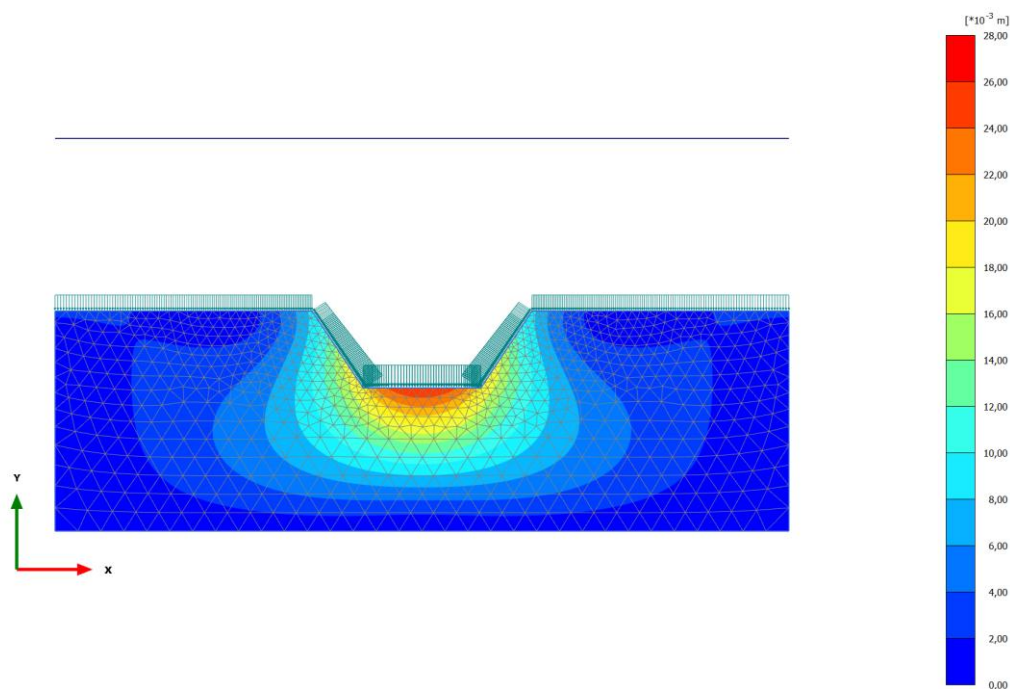


Рис. 2. – Схема деформации грунтового основания подводной траншеи.

На рис. 3 показана схема перемещений в массиве дна реки и деформации затопляемых секций подводного тоннеля. Для получения результатов деформации массива грунта от погружения секции тоннеля предыдущие перемещения были аннулированы. Поэтому деформация дна реки при погружении секции составит 1,7 см.

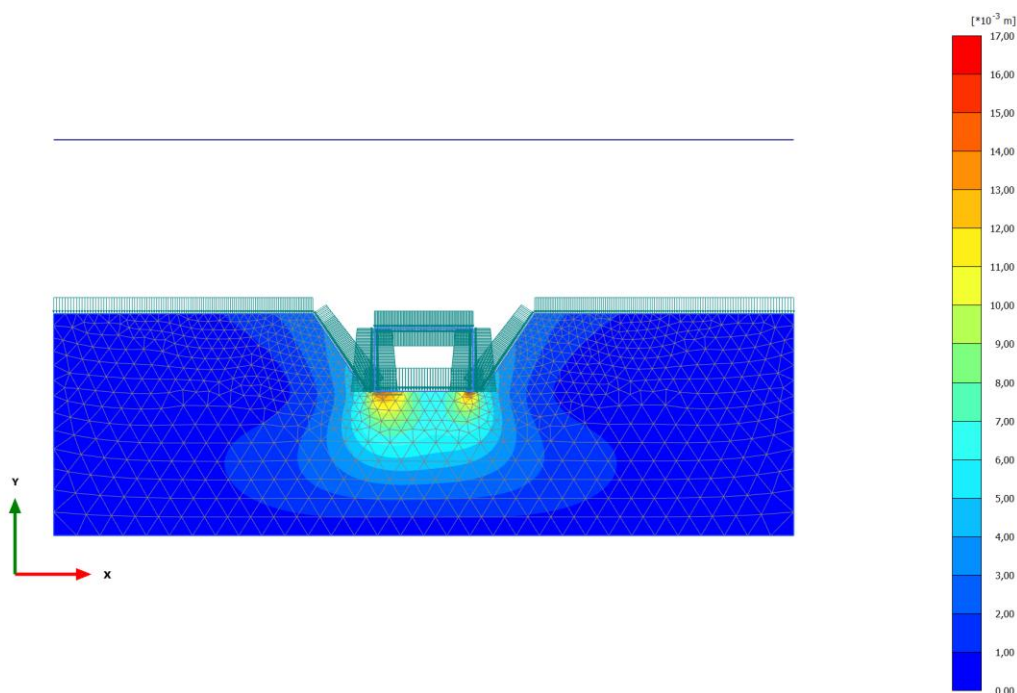


Рис. 3. – Схема деформации траншеи при погружении секции тоннеля.

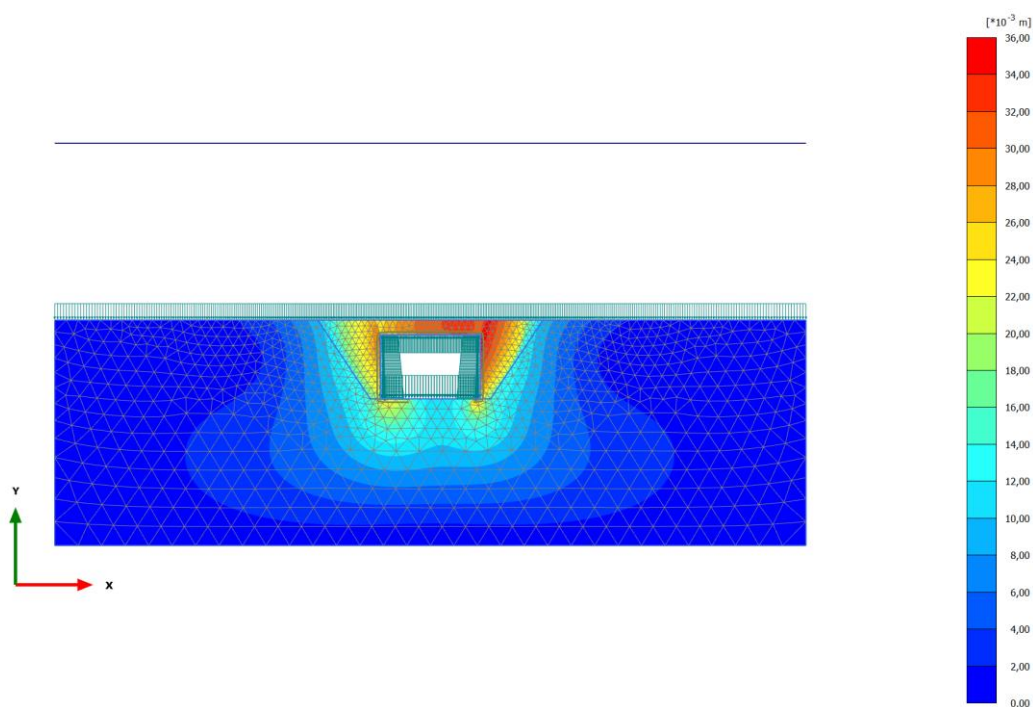


Рис. 4. – Схема деформации массива грунта при обратной засыпке.

На рис.4 показана картина деформированного состояния массива и конструкций секции в момент ее обратной засыпки песчано-каменным

материалом с последующей откачкой воды из тоннеля. Максимальная деформация составит 3,6 см. В период последующей эксплуатации подводного тоннеля, в расчетную схему добавляют нагрузку от движущегося поезда метро (рис.5).

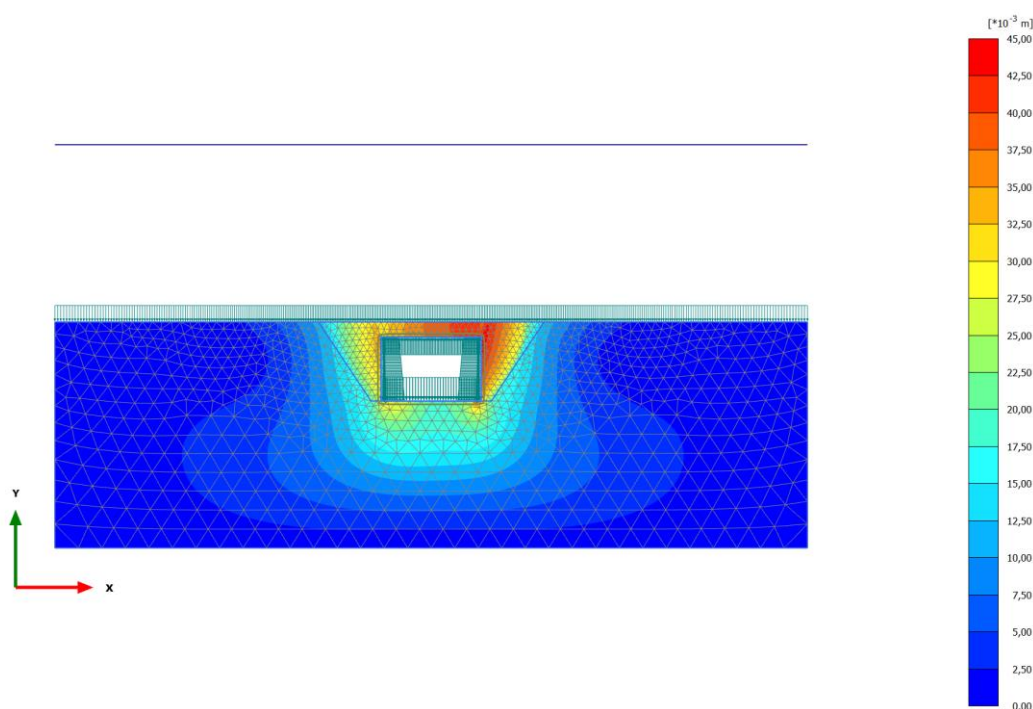


Рис. 5. – Моделирование эксплуатации подводного тоннеля.

На стадии эксплуатации подводного тоннеля максимальная осадка в зоне обратной засыпки составляет 4,5 см при условии, что секция выполнена из монолитного железобетона. Можно сделать вывод о том, что, в результате моделирования подводного тоннеля методом опускных секций, допустимая осадка находится в пределах нормы (5 см). Значит, строительство данного тоннеля допустимо.

Также, по результатам проведенного математического моделирования, можно сделать вывод о том, что подводный тоннель является прекрасным конкурентом мостовым переходам через водные преграды.

Литература

1. Маковский Л.В., Кравченко В.В. Подводные транспортные тоннели из опускных секций. М.: ООО "Издательство "КноРус". 2020. 144 с.
2. Маковский, Л. В. Перспективы развития подводного транспортного тоннелестроения // Наука и техника в дорожной отрасли. 2007. № 4. С. 18-20.
3. Поляков В.Ю., Хорев И.В., Демидов И.М. Современные подходы к исследованию и разработке подводных плавающих сооружений // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 3. с.1–38.
4. Borg A., Bjelland H., Niya O. Reflections on Bayesian Network models for road tunnel safety design: A case study from Norwa // Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 43. 2014. URL: doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.004.
5. Hong K. Typical Underwater Tunnels in the Mainland of China and Related Tunneling Technologies // Bridge Engineering and Tunnel Engineering. Vol.3, Issue 6. 2017. URL: doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.007.
6. Грудский В.А. Анализ ресурса плавучести секций новых придонных тоннелей на этапах строительства // Естественные и технические науки. 2012. № 1. С. 398-401.
7. Ефимов Д.С., Тимошенко В.А. Обоснование улучшения конструкций всасывающих наконечников землесосов // Машины и оборудование природообустройства и защиты окружающей среды: Сборник статей студентов и молодых ученых. Том 6. Новочеркасск: Новочеркасская государственная мелиоративная академия, 2011. С. 65-67.
8. Иванов П.А., Страшный А.П. Уникальные конструктивные решения морских ГТС в современной России - проектные решения АО "ГТ Морстрой" // Гидротехника. 2021. № 4. С. 36-39.
9. Гергарт Ю.А. Методика испытания горных пород на прочность неразрушающим методом при проходке транспортных тоннелей //



Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2118.

10. Бехтев И.К. Верификация полуэмпирического метода прогноза осадок Р.Б. Пека для щитовой проходки транспортных тоннелей мелкого заложения // Инженерный вестник Дона. 2020. №5. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6474.

References

1. Makovskij L.V., Kravchenko V.V. Podvodnye transportnye tonneli iz opusknyh sekcij [Underwater transport tunnels made of lowered sections]. M.: ООО "Izdatel'stvo "KnoRus". 2020. 144p.

2. Makovskij, L. V. Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli. 2007. № 4. pp. 18-20.

3. Poljakov V.Ju., Horev I.V., Demidov I.M. Transportnye sooruzhenija. 2022. Т. 9, № 3. pp.1-38.

4. Borg A., Bjelland H., Niya O. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 43. 2014. URL: doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.004.

5. Hong K. Bridge Engineering and Tunnel Engineering. Vol.3, Issue 6. 2017. URL: doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.007.

6. Grudskij V.A. Estestvennye i tehicheskie nauki. 2012. № 1. pp. 398-401.

7. Efimov D.S., Timoshenko V.A. Mashiny i oborudovanie prirodoobustrojstva i zashhity okruzhajushhej sredy: Sbornik statej studentov i molodyh uchenyh. Tom 6. Novoчеркасска: Novoчеркасская gosudarstvennaja meliorativnaja akademija, 2011. pp. 65-67.

8. Ivanov P.A., Strashnyj A.P. Gidrotehnika. 2021. № 4. pp. 36-39.

9. Gergart Ju. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013, №4. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2118.

10. Behtev I.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №5. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6474.