

## Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния реконструируемого Кузнецовского тоннеля

*А.А. Закавова, А.В. Манько*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Широкомасштабное освоение земель России привело к созданию железнодорожной сети. Вместе с прокладкой железной дороги возводилась и вся транспортная инфраструктура, такие, как мосты, тоннели, путепроводы. Многим строениям уже более 100 лет. Сооружения ветшают и подходят к концу своего жизненного цикла. Поэтому необходимо реконструировать или демонтировать данные сооружения. В связи с возросшими грузоперевозками между Китаем, Россией и странами Западной Европы возникла необходимость в реконструкции всех тоннелей на БАМе. В данной работе приведен один из вариантов реконструкции тоннеля и исследовано методом математического моделирования напряженно-деформированное состояние системы «массив-сооружение», по которому тоннель может быть реконструирован.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, железнодорожный тоннель, реконструкция, метод конечных элементов, буровзрывные работы, механизированная проходка, горный комбайн, перемещения, Байкало-Амурская магистраль.

### Введение

Кузнецовский железнодорожный тоннель Байкало-Амурской магистрали (БАМ) был возведен в период с 1940 по 1945 годы с непродолжительным перерывом на Великую Отечественную Войну [1].

В 1939 году начали проводить исследования для строительства железной дороги между Комсомольском и Советской Гаванью. Строительство началось в 1941 году, но было прервано из-за начала Великой Отечественной войны. Через два года, в мае 1943 года, Государственный комитет обороны принял решение возобновить строительство данной железной дороги, которая была задумана как дополнительный маршрут Транссибирской магистрали к Тихому океану.

Один из самых сложных этапов строительства новой железной дороги заключался в преодолении Сихотэ-Алиньского хребта. Было рассмотрено 30 различных вариантов прокладки пути на этом участке, после чего

специалисты выбрали две основные схемы, разработанные экспедициями А.П. Кузнецова и В.И. Реймерса. Начато строительство в октябре 1943 года. Нормы строительства были упрощены, и первые поезда прошли по тоннелю в начале июля 1945 года [2].

К началу XXI века тоннель находился в критическом состоянии. Из-за перепада высот на перевале, габаритов тоннеля и множества поворотов малого радиуса максимальный вес поездов составлял 4000 тонн. Использовались два трёхсекционных тепловоза: один спереди и один сзади в качестве толкача.

В связи с увеличением грузоперевозок между Китаем, Россией и странами Западной Европы, возникла необходимость реконструкции всех тоннелей на БАМе. Первым был отремонтирован Кузнецовский тоннель. После проведения всесторонних изысканий было решено, что экономически целесообразнее построить новый тоннель немного в стороне от старого для увеличения пропускной способности БАМа.

Открытие Нового Кузнецовского тоннеля в 2021 году привело к значительному снижению грузоперевозок по старому тоннелю [3]. Однако проблемы с габаритами старого тоннеля остаются, так как они были спроектированы согласно довоенным стандартам для паровозов. Современные поезда и локомотивы испытывают трудности при прохождении через тоннель. Поэтому реконструкция старого Кузнецовского тоннеля остается необходимой для увеличения грузопотока в сторону Тихого океана и развития экономики Дальнего Востока. В данной статье представлен один из вариантов математического моделирования напряженно-деформированного состояния системы «массив-сооружение», на основе которого можно провести реконструкцию тоннеля.

## Материалы и методы

Целью исследования является необходимость определить НДС массива и реконструируемого тоннеля с учетом нового контура выработки, новой обделки и технологии реконструкции. Сначала необходимо установить новые актуальные габариты приближения для реконструируемого тоннеля.

Согласно ГОСТу, габарит приближения строений ограничивает контур, внутри которого не должно быть никаких объектов или материалов рядом с железнодорожными путями, за исключением определенных устройств, взаимодействующих с железнодорожным подвижным составом.

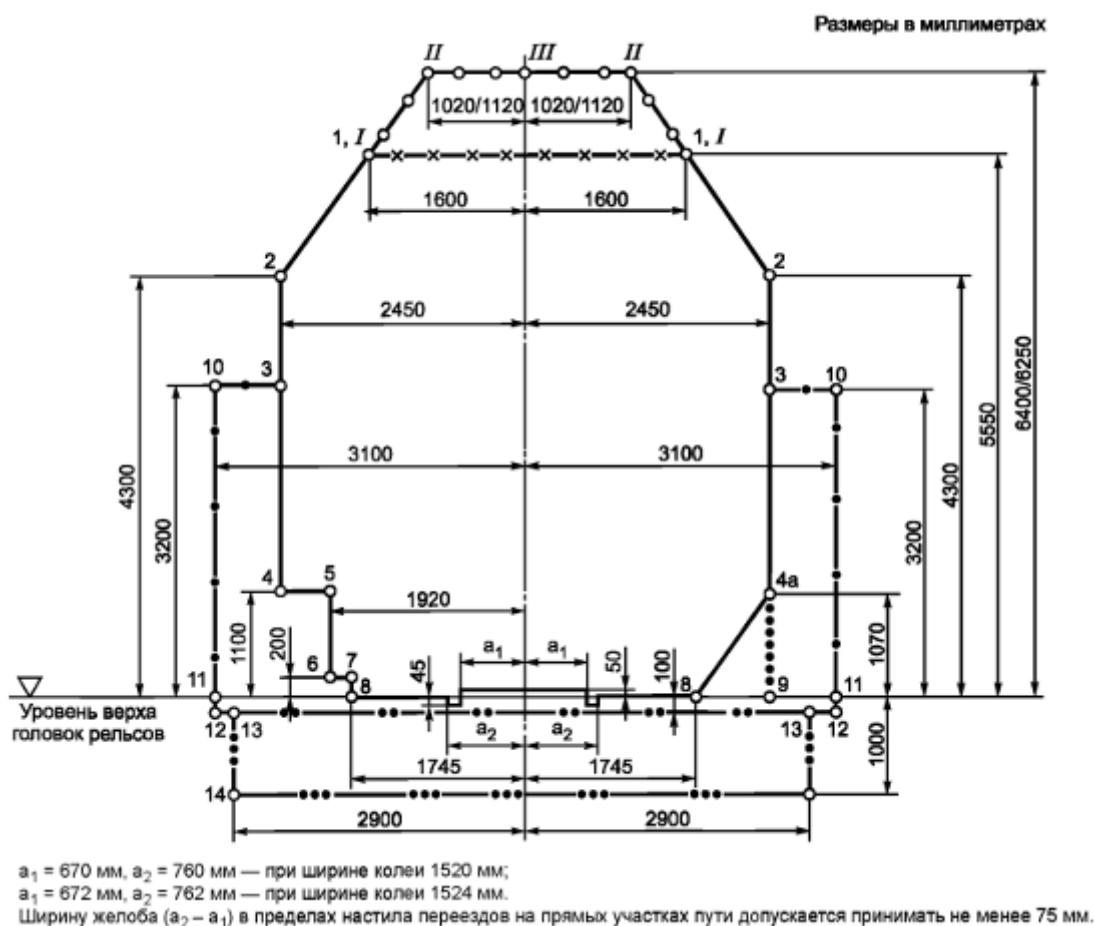


Рис. 1. – Габарит приближения тоннеля, тип «С»

В данном исследовании рассматривается габарит приближения типа "С" (Рис.1), который относится к объектам, расположенным рядом с железными дорогами общего пользования.

После определения габаритов приближения необходимо выбрать тип технологии разработки грунта для раскрытия сечения тоннеля на большую площадь.

В качестве двух основных технологий по реконструкции тоннеля приняты буровзрывные работы и механизированная проходка проходческими комбайнами избирательного действия.

Процесс буровзрывных работ, который направлен на разрушение и измельчение горных пород, включает в себя несколько последовательных этапов. Эта методика применяется в породах скального и полускального типа, обеспечивая высокую производительность и скорость выполнения работ. Однако в результате взрывной волны нарушается целостность окружающего горного массива, что может привести к увеличению переборов, неровностей контура выработки и объему разрабатываемых пород [4, 5]. Метод буровзрывных работ заключается в осуществлении процесса бурения скважин в забое и последующем взрывании зарядов взрывчатых веществ (ВВ) для разделения пород или руды от массива.

При создании горной выработки с использованием буровзрывного метода процесс можно разделить на несколько этапов, которые выполняются последовательно. Процесс включает в себя выполнение следующих этапов: бурение скважин, зарядку их взрывчатыми веществами, проведение вентиляции после взрыва, удаление выработанной породы и установку постоянной поддержки. Дополнительные действия включают установку временных и постоянных железнодорожных путей, создание дренажного канала, установку вентиляционных труб, прокладку коммуникаций (труб для сжатого воздуха, воды, электрических кабелей и сигнализации) и установку освещения.

Все операции по созданию проходов следуют циклической схеме. Проходческий цикл представляет собой совокупность операций по созданию

---

прохода, повторяющихся через равные промежутки времени, в течение которых забой проходит определенный путь (обычно равный длине хода). Продолжительность цикла при скоростном проходке составляет 2-3 часа, при обычном - около 6-7 часов.

Проходочные комбайны автоматизируют процессы разделения горной массы от забоя. Комбайн добывает породу слоями толщиной 10-20 см и загружает разработанный грунт в вагонетки, освобождая рабочее пространство [6, 7].

Существуют различные виды комбайнов, в зависимости от области применения, метода обработки забоя и конструкции исполнительного устройства. Данная технология применяется в породах средней крепости.

Это исследование было проведено с использованием численного метода в программном комплексе PLAXIS 2D, специализированном компьютерном инструменте, основанном на методе конечных элементов. Этот комплекс при правильном использовании позволяет определять напряженно-деформированное состояние как в грунтовых массивах, так и в конструкциях, взаимодействующих с грунтом на любой стадии строительства [8].

Для поставленной задачи математическое моделирование выполняется в плоской постановке. Принятая модель грунта в расчетах – линейно-упругая модель Linear Elastic (LE). Линейно-упругая модель основана на законе Гука для изотропной упругости [9]. Для моделирования бетона используется линейная модель упругого материала [10]. Выбор размеров расчетной области осуществляется на основе условия отсутствия перемещений на границе. Размер зоны влияния строительства можно ограничивать таким расстоянием, при котором дополнительная осадка грунтового массива не превышает 1 мм. Расчетная модель имеет размеры 83 м по горизонтали и 25 м по вертикали. (рис.2).

---

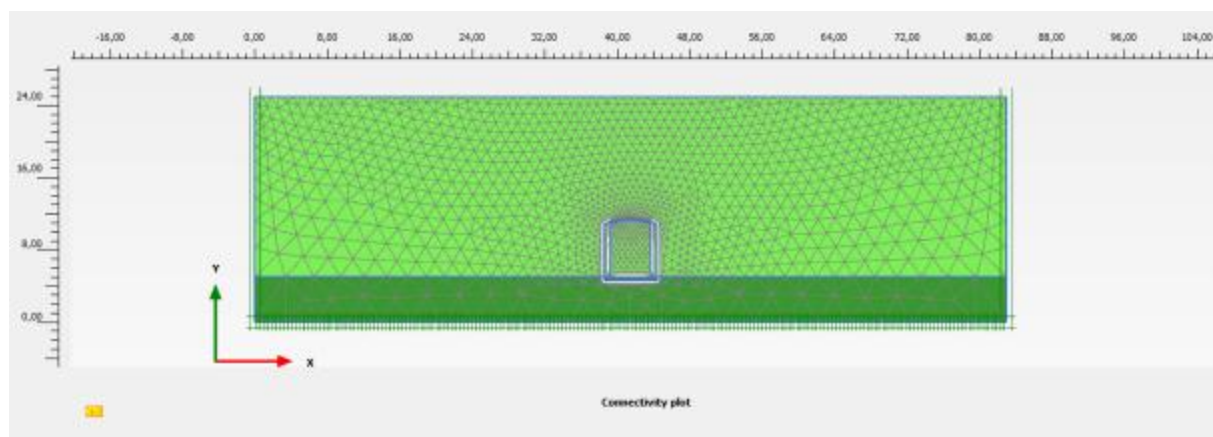


Рис. 2. – Расчетная модель исследования

Материалом конструкции тоннеля является элемент Plate с набором характеристик, соответствующих обделке. На внешней грани тоннеля задается поверхность раздела фаз – интерфейс, всем грунтам во вкладке Materials\_Interfaces присваивается значение  $R_{inter}=0,6$ , что соответствует контакту «бетон-грунт». Также тоннелю присваивается функция линейной усадки – Create line construction, значение  $C_{ref}=2\%$ . Уровень грунтовых вод задавался на абсолютной отметке 600,0.

### Результаты исследования

В результате численного эксперимента были проведены две серии математического моделирования в соответствии с технологией реконструкции.

- Моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива проводилось в соответствии с историей его нагружения на следующих этапах:
- Учет начальных напряжений в грунтовом массиве (собственный вес грунта);
- Анализ поведения грунтового массива с учетом конструкции Кузнецовского тоннеля до реконструкции;

- Последовательное изучение сечения тоннеля (новое сечение после реконструкции).
  - Разработка для технологии БВР;
  - Разработка механизированным способом (10 этапов раскрытия сечения).

Различие в моделировании двумя способами заключается в объеме грунта, который вынимается из выработки. При механизированном способе – сечение раскрывается послойно как показано на рис.3.

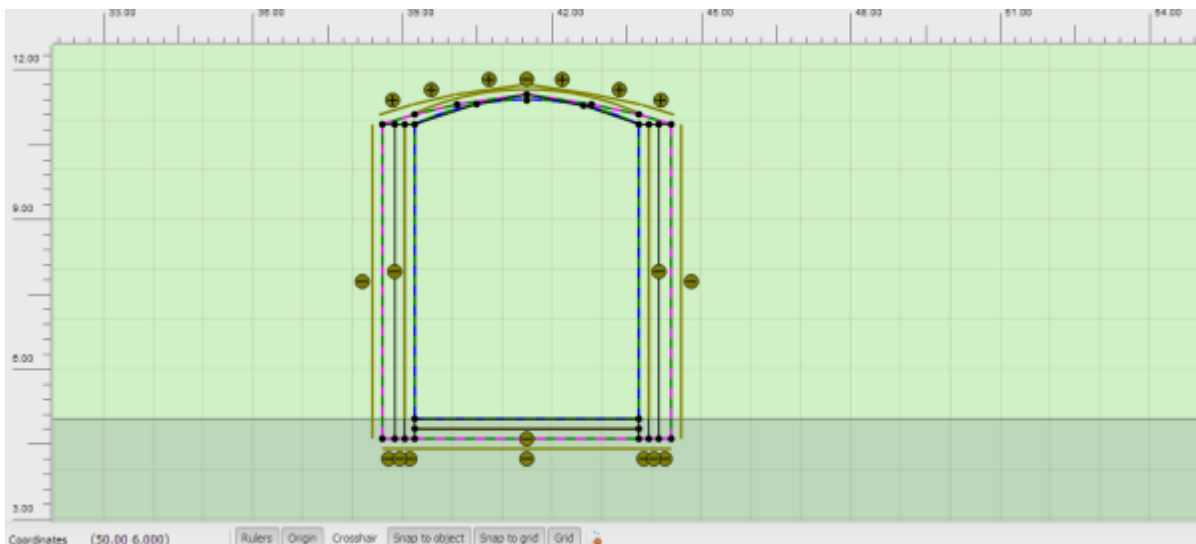


Рис. 3. – Раскрытие сечения при механизированном раскрытии сечения

Сначала ведется разработка лотковой части, а затем разрабатываются стены поочередно справа и слева, слой за слоем чередуя стороны. Такая технология позволяет уменьшить напряжения и дополнительные деформации, возникающие от вновь приложенной нагрузки на свод и обделку тоннеля со стороны грунтового массива.

Схема раскрытия сечения при буровзрывном способе проходки показана на рис. 4. Для буровзрывного способа – тоннель раскрывается взрывами на полное сечение на глубину одной захватки.

На рис. 5 представлены результаты моделирования механизированного раскрытия сечения при помощи горных комбайнов.



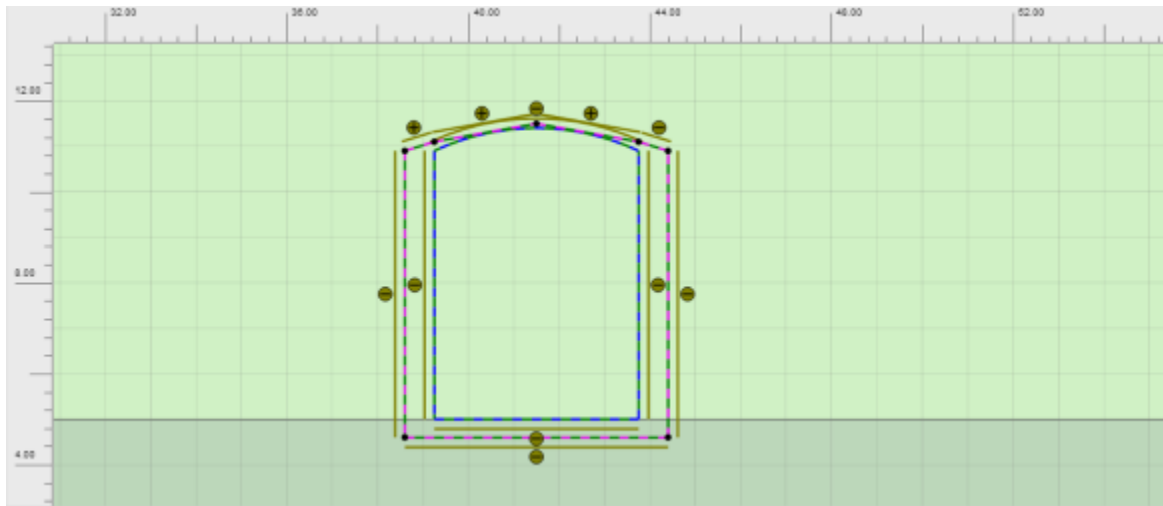
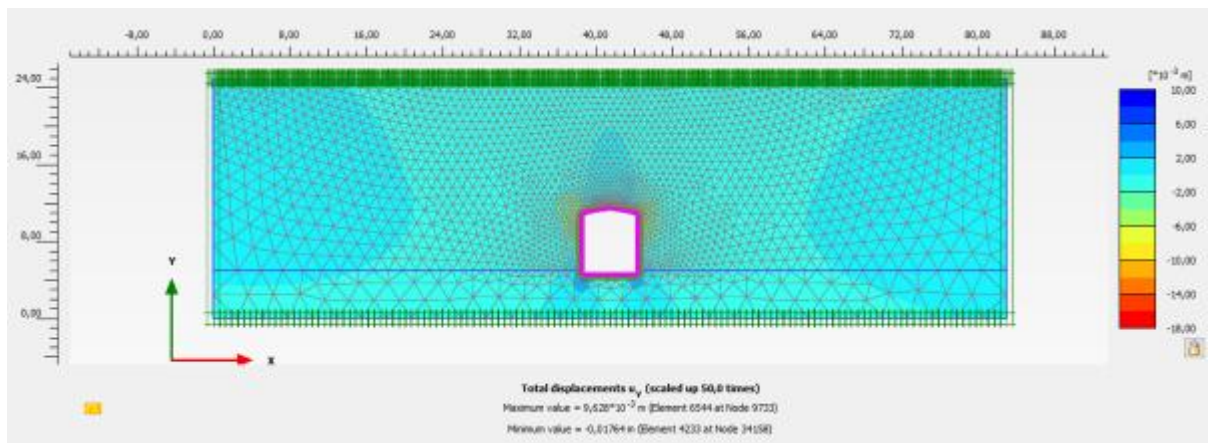
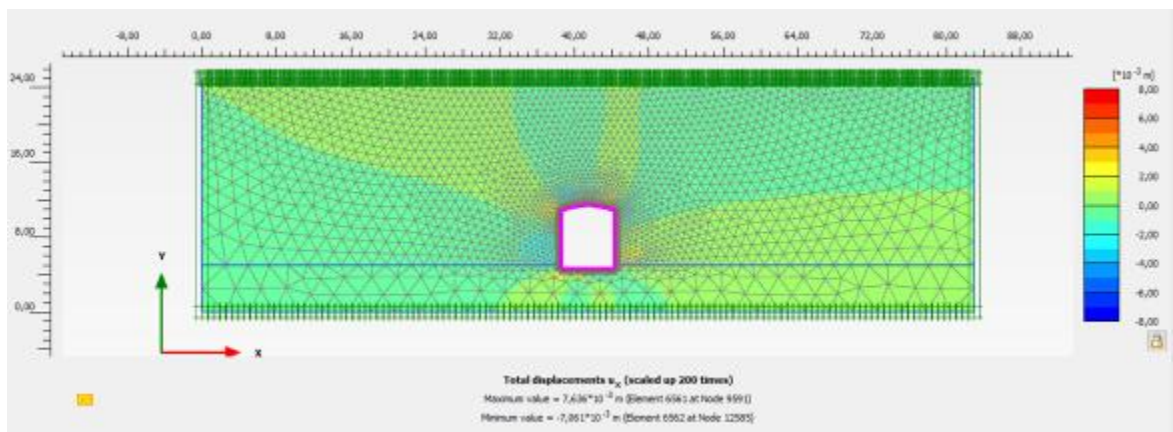


Рис. 4. – Раскрытие сечения при буровзрывном способе раскрытия сечения.



а)

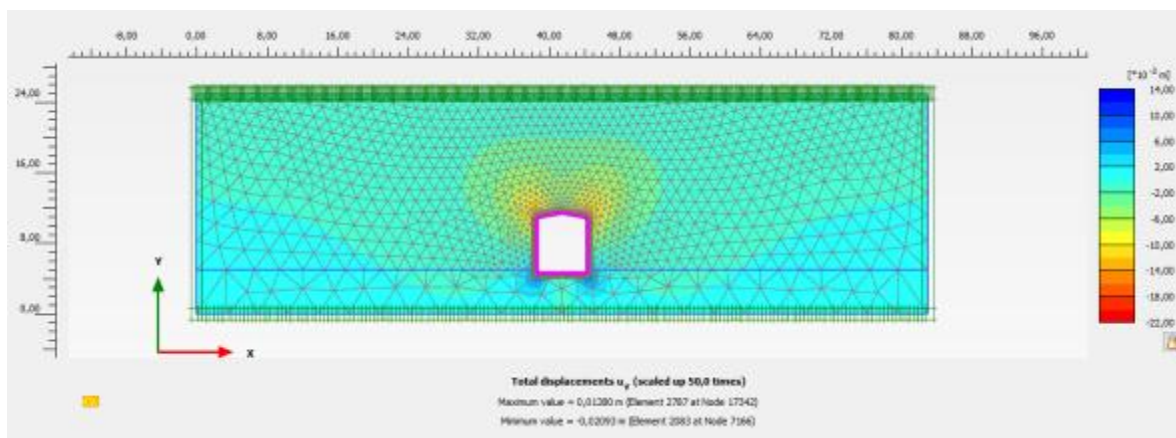


б)

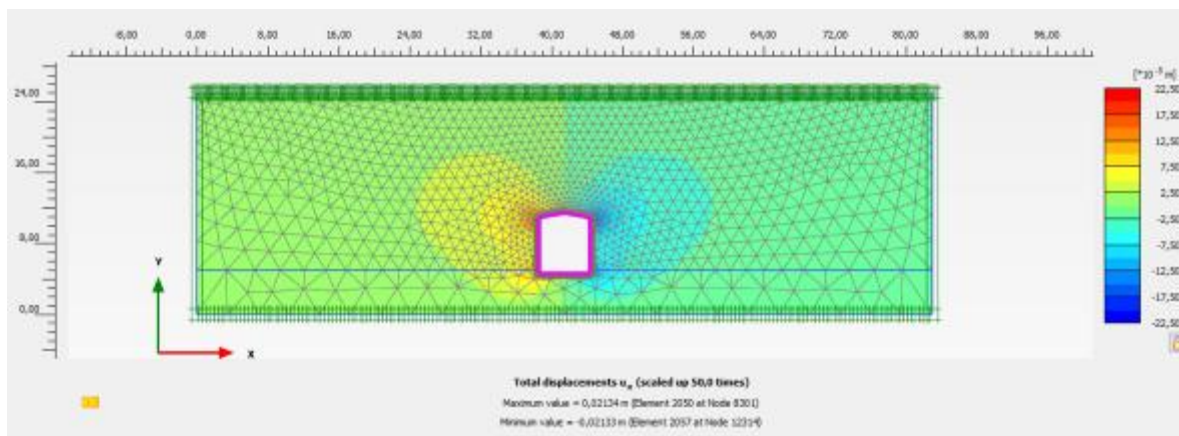
Рис. 5. – Изополя перемещений в массиве при механизированном способе раскрытия сечения: а) вертикальные; б) горизонтальные



На рис. 6 представлены результаты моделирования раскрытия сечения при буровзрывном способе.



а)



б)

Рис. 6. – Изополя перемещений в массиве при буровзрывном способе раскрытия сечения: а) вертикальные; б) горизонтальные

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что при механизированной проходке вертикальные и горизонтальные перемещения составляют 9,6 мм и 7,6 мм, соответственно. При буровзрывных работах вертикальные и горизонтальные перемещения в массиве составляют 14 мм 21 мм, соответственно. При буровзрывных работах перемещения существенно больше из-за сейсмического воздействия взрыва на окружающий массив. Следовательно, более предпочтительно

применять при реконструкции железнодорожного тоннеля механизированный способ раскрытия сечения.

### **Выводы.**

В ходе исследования было рассмотрено и изучено НДС грунтового массива вокруг реконструируемого тоннеля, а также поведение конструкции тоннеля при двух возможных вариантах используемой технологии. Можно сделать вывод, что перемещения грунта и конструкций тоннеля почти во всех случаях больше при моделировании проходки тоннеля буровзрывным способом. Из чего следует, что проходка тоннеля при его реконструкции механизированным способом с использованием комбайна при данных инженерно-геологических условиях - более предпочтительный вариант.

### **Литература**

1. Еланцева О.П. Строительство № 500 НКВД СССР: железная дорога Комсомольск – Советская Гавань (1930-е–40-е годы). Владивосток: Издательство Дальневосточного университета, 1995. 100 с.
2. Залужная Д.В. Транссибирская магистраль (её прошлое и настоящее): исторический очерк. М.: Мысль, 1980. 287 с.
3. Леонтьев Р.Г., Комарова В.В., Каликина Т.Н. Железнодорожный транспорт Дальнего Востока РФ: сетевые особенности, тенденции перевозок и программы развития // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2008. № 12. С. 16-29.
4. Гендлер С.Г., Виноградов Ю.И., Лебедев М.О. Сейсмическое влияние взрывов на обделку эксплуатируемых тоннелей при сооружении параллельных выработок // Взрывное дело. 2011. № 106-63. С. 207-218.
5. Özgür Satici. Drilling and blasting as a tunnel excavation method. Ankara. 2006. 24 p.

6. Безродный К.П., Лебедев М.О. Формирование напряженного состояния временной крепи при строительстве транспортного тоннеля СКЖД вблизи склона // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 6. С. 237-244.

7. Nosenko A.S., Domnitskiy A.A., Nosenko V.V., Altunina M.S., Zubov V.V., Kirsanov I.A. Combine technology in construction of transport tunnels // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 16–19 июня 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Vol. Volume 839. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 52043. DOI 10.1088/1755-1315/839/5/052043.

8. Толмачев Д.А., Рамазанов А.Г. Определение несущей способности одиночной сваи путем моделирования испытаний в программном комплексе Plaxis 2D // Инженерный вестник Дона. 2023. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8578.

9. Боргоякова Т.Г., Лозицкая Е.В. Системный анализ и математическое моделирование // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763.

10. Звонарев С.В. Основы математического моделирования. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2019. 112 с.

### References

1. Elanceva O.P. Stroitel'stvo № 500 NKVD SSSR: zheleznaja doroga Komsomol'sk – Sovetskaja Gavan' (1930-e–40-e gody) [Construction No. 500 of the USSR NKVD: the Komsomolsk-Sovetskaya Gavan railroad (1930s-40s)]. Vladivostok: Izdatel'stvo Dal'nevostochnogo universiteta, 1995. 100 p.

2. Zaluzhnaja D.V. Transsibirskaja magistral' (ejo proshloe i nastojashhee): istoricheskij ocherk [Trans-Siberian Railway (its past and present): historical sketch]. М.: Mysl', 1980. 287 p.



3. Leont'ev R.G., Komarova V.V., Kalikina T.N. Transport: nauka, tehnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik. 2008. № 12. pp. 16-29.
4. Gendler S.G., Vinogradov Ju.I., Lebedev M.O. Vzryvnoe delo. 2011. № 106-63. pp. 207-218.
5. Özgür Satici. Drilling and blasting as a tunnel excavation method. Ankara. 2006. 24 p.
6. Bezrodnyj K.P., Lebedev M.O. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2012. № 6. pp. 237-244.
7. Nosenko A.S., Domnitskiy A.A., Nosenko V.V., Altunina M.S., Zubov V.V., Kirsanov I.A. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 16–19 июня 2021/ Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Vol. Volume 839. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 52043. DOI 10.1088/1755-1315/839/5/052043.
8. Tolmachev D.A., Ramazanov A.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8578](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8578).
9. Borgojakova T.G., Lozickaja E.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763).
10. Zvonarev S.V. Osnovy matematicheskogo modelirovanija [Fundamentals of mathematical modeling]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta. 2019. 112 p.

**Дата поступления: 2.04.2024**

**Дата публикации: 6.05.2024**