

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 3 / 2024, Vol. 11, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS324.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS324 (<https://doi.org/10.15862/04SATS324>)

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

УДК 624.1

История развития тоннелестроения и его современное состояние

¹Куровский С.В., ²Соснин Д.А., ¹Мишин Д.А.

¹ООО «Высшая Школа Образования», Москва, Россия

²ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

Автор, ответственный за переписку: Мишин Денис Александрович, e-mail: 9651530@gmail.com

Аннотация. В данной статье представлены вопросы, отражающие историю развития тоннелестроения и современное его состояние. Для того чтобы раскрыть данную тематику, структура статьи определяется следующими блоками: введение, характеристика исторических этапов и ретроспективы мирового тоннелестроения, перспективные направления международного тоннелестроения и строительства транспортных путей, ключевые направления научных исследований в сфере развития мирового тоннелестроения, экспериментальные и теоретические методы в проведении современных научно-исследовательских работ в сфере тоннелестроения, выводы. На современном этапе ключевыми направлениями научных исследований в сфере развития мирового тоннелестроения выступают: формирование методологических основ, а также модульных программ, способных автоматизировать процессы проектирования тоннелей при помощи современных цифровых технологий; перспективное развитие горных методов в тоннелестроении при полускальных либо скальных массивах грунта, практическое использование прогрессивных технологий формирования методов в тоннелестроении, оптимальных

типов опережающих и контурных крепей с одновременным применением прорывных инноваций проходки в тоннелестроении, которая обеспечивает крайне высокое значение прироста, уменьшение стоимостных характеристик выполняемых строительных работ. Постепенно сфера тоннелестроения становится в индустриальном сообществе наукоемким сектором, обусловлена масштабным практическим применением инновационно-цифровых технологий на базе экономичных строительных конструкций, высокопроизводительных механизированных и автоматизированных комплексов, инновационных строительных материалов, оптимальных методов выполнения строительных работ, что обеспечивает достаточно высокое значение прироста в строительном секторе с учётом соблюдения экологической и технической безопасности.

Ключевые слова: тоннелестроение; история развития; современное состояние; научно-исследовательские работы; методы; прогрессивные технологии; перспективные направления

History of development of tunnel construction and its current status

¹Stanislav V. Kurovsky, ²Dmitry A. Sosnin, ¹Denis A. Mishin

¹Higher School of Education, Moscow, Russia

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Corresponding author: Stanislav V. Kurovsky, e-mail: 9651530@gmail.com

Abstract. This article presents the issues reflecting the history of tunnel construction development and its current state. In order to fully explore given subject, the article structure is defined by the following blocks: introduction, characteristic of historical stages and retrospective of the world tunnel construction, perspective directions of international tunnel construction and construction of transport routes, key directions of scientific researches in the sphere of world tunnel construction development, experimental and theoretical methods in carrying out modern research works in the tunnel construction sphere, conclusions. At the present stage the key directions of scientific researches in the sphere of the world tunnel construction development are: formation of methodological bases as well as modular programs capable to automate the processes of tunnel designing with the help of modern digital technologies; perspective development of mining methods in tunnel construction at half-rock or rocky soil mass, practical use of progressive

methods formation technologies in tunnel construction, optimal types of advance and contoured supports with simultaneous use of modern tunnel construction methods, which provides an extremely high value of increase, reduction of cost characteristics of performed construction works. The tunnel construction sphere is gradually becoming a science-intensive sector in the industrial community, is caused by large-scale practical application of innovative digital technologies on the basis of economical building structures, high-performance mechanised and automated complexes, innovative building materials, optimal construction work methods, which provides a sufficiently high value of growth in the construction sector taking into account the observance of ecological and technical safety.

Keywords: tunnel construction; history of development; modern state; scientific research; methods; progressive technologies; perspective directions

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В исторической ретроспективе тоннели появились на фоне необходимости добычи различных полезных ископаемых, руд, в целях постоянного обеспечения муниципальных образований и крепостей водными ресурсами.

Появившиеся первые тоннели могли обслуживать только движение транспортных средств, их строили в достаточно крепких скальных породах, формируемых посредством ручного труда, постоянной обделки у тоннелей не было.

Последующее развитие внешнеэкономических отношений способствовало строительству тоннелей для движения морского транспорта в европейских каналах [1; 2].

В соответствии с историческим развитием тоннелестроения, являющегося типом инженерно-технической деятельности, выявляются три исторические стадии:

1. Этап I: расцвет Древней Римской Империи и Древней Греции, период Древнего мира.
2. Этап II: Средневековье и заканчивая XVIII веком.
3. Этап III: с XIX века и по настоящее время.

Характеристика исторических этапов и ретроспективы мирового тоннелестроения

Characterisation of historical stages and retrospective of the world tunnel construction industry

Исторические истоки тоннелестроения относятся к временному периоду Древнего мира.

Работы в подземном пространстве, осуществляемые на территории Рима, Вавилона, Греции, Египта, были ориентированы на добычу разных полезных ископаемых, конструирования храмов.

Позже тоннели были необходимы для транспортной логистики и обеспечения водоснабжения на территории.

В таблице 1 представлена краткая характеристика исторической ретроспективы мирового тоннелестроения.

При строительстве тоннелей на третьем этапе возникали различные сложности. Например, при конструировании первого Симплонского

тоннеля (рис. 1) возникли такие проблемы, как: значительное горное давление, существенный приток горячей воды, температура доходила до 55 градусов по Цельсию.

На территории Швейцарии достаточно масштабным проектом стало возведение железнодорожного тоннеля в горной местности, суммарная длина которого — более 50 километров. Этот железнодорожный тоннель предназначен для объединения автодорожных магистралей Швейцарии, Италии и Германии [3].

Таблица 1 / Table 1

Краткая характеристика
исторической ретроспективы мирового тоннелестроения
Brief characterisation of the historical
retrospective of the world tunnel construction industry

Наименование этапа <i>Stage name</i>	Краткое содержание, значимые исторические события <i>Summary, significant historical events</i>
Этап I: расцвет Древней Римской Империи и Древней Греции, период Древнего мира <i>Stage I: the heyday of the Ancient Roman Empire and Ancient Greece, the period of the Ancient World</i>	Появление дренажных, автодорожных, водопроводных тоннелей, некоторые из которых функционируют и в настоящее время <i>The emergence of drainage, road, and water tunnels, some of which are still in operation today</i>
	Работы по тоннелестроению преимущественно осуществлялись огневым способом <i>Tunnelling works were predominantly carried out by fire method</i>
	После того, как Древняя Римская Империя распалась, в развитии мирового тоннелестроения произошла стагнация <i>After the Ancient Roman Empire collapsed, the development of the world tunnel construction industry stagnated</i>
Этап II: Средневековье и заканчивая XVIII веком <i>Stage II: Middle Ages to the end of the XVIII century</i>	На фоне расширения внешнеэкономических отношений, желания уменьшить торговые морские пути стали возводить судоходные тоннели, с помощью которых объединялись морские пути <i>Following the expanding external economic relations and the desire to reduce trade sea routes, they began to build canal tunnels, which united sea routes</i>
	Во Франции и Англии было сделано рекордное число тоннелей для морского транспорта — 40–60 единиц <i>In France and England a record number of tunnels for maritime transport was made — 40–60 units</i>
	По длине и внутреннему сечению рекордным стал Ровский тоннель <i>In terms of length and inside dimension, the Rove Tunnel became a record-breaking tunnel</i>
	Последующее развитие мирового тоннелестроения было обусловлено возникновением железнодорожных путей <i>The subsequent development of the world tunnel construction was conditioned by the emergence of railway tracks</i>
Этап III: с XIX века и по настоящее время <i>Stage III: from the XIX century to the present day</i>	Появление тоннелей для железнодорожного транспорта <i>Emergence of tunnels for railway transport</i>
	Существование ограничений в конструировании длинных тоннелей по причине недостаточно уровня техники и оборудования <i>The existence of limitations in the construction of long tunnels due to insufficient technology and equipment</i>
	Появление бетонных и подводных тоннелей в мире <i>The emergence of concrete and underwater tunnels in the world</i>

Источник¹ / Source¹

¹ Краткая история развития тоннелестроения [Электронный ресурс]. — URL: <https://snoval.wixsite.com/pgupst-m/blank-eijq1> (дата обращения: 22.06.2024).



Рисунок 1. Симплонский тоннель

(источник: <https://www.techeblog.com/slj900-32-is-the-massive-580-ton-machine-they-use-to-buildbridges-these-videos-show-how/>. Автор: Jackson Chung)

Figure 1. Simplon Tunnel

(source: <https://www.techeblog.com/slj900-32-is-the-massive-580-ton-machine-they-use-to-buildbridges-these-videos-show-how/>. Author: Jackson Chung)

Перспективные направления международного тоннелестроения и строительства транспортных путей

Promising directions of international tunnel construction and construction of transport routes

В международном сообществе на этапе проектирования и практического осуществления находится многообразие инициатив, способствующих развитию строительного сектора, транспортной логистики, в частности, масштабное строительство различных тоннелей (городских, водных, горных). Содержание весьма крупных и перспективных инициатив в мировом тоннелестроении отражено в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Содержание весьма крупных
и перспективных инициатив в мировом тоннелестроении**

**Contents of very large and promising
initiatives in the world tunnel construction industry**

Тоннель <i>Tunnel</i>	Общая длина, километров <i>Total length, kilometres</i>	Тип тоннеля <i>Tunnel type</i>	Период введения тоннеля в эксплуатацию <i>Tunnel commissioning period</i>
Тоннель через Корейский пролив <i>Tunnel through the Korea Strait</i>	182	Водный <i>Water</i>	—
Тоннель через Альпы, соединение Италии и Австрии <i>Tunnel through the Alps, connecting Italy and Austria</i>	56	Горный <i>Mountain</i>	2025
Тоннель через Альпы, соединение Италии и Франции <i>Tunnel through the Alps, linking Italy and France</i>	52	Горный <i>Mountain</i>	2023
Тоннель через Гибралтарский пролив <i>Tunnel through the Strait of Gibraltar</i>	39	Водный <i>Water</i>	2025
Тоннель в Китае <i>Tunnel in China</i>	33	Горный <i>Mountain</i>	2024
Тоннель, соединение Дании и Германии <i>Tunnel, connecting Denmark and Germany</i>	18	Горный <i>Mountain</i>	2024
Тоннель в Швеции <i>Tunnel in Sweden</i>	16	Городской <i>Urban</i>	2024

Источник: составлено автором на основе [1; 3–6] / Source: compiled by the author based on [1; 3–6]

В европейских государствах продолжится строительство тоннелей, что способствует развитию сети автомобильных магистралей через все страны-члены ЕС.

При активном возведении горных и водных мировых тоннелей будет сформирована международная транспортная система, с помощью которой можно будет объединить автодорожные магистрали и железнодорожные пути. Такая международная система будет обеспечена работой транспортными высокоскоростными средствами.

На рисунке 2 приведена карта перспективной автотранспортной системы на территории РФ.

Перспективным направлениям международного тоннелестроения и строительства транспортных путей также способствует активное функционирование компаний-производителей оборудования и технических устройств для конструирования тоннелей. Международными организациями, занимающими лидирующие позиции в отраслевом секторе по изготовлению инновационных механизированных комплексов в тоннелестроении, выступают Herrenknecht, Wirth (Германия), Lovat (Канада), Mitsui Miike Machinery Co, Kawasaki Heavy Industries Ltd (Япония), The Robbins Company (США).

ПЕРСПЕКТИВНАЯ СЕТЬ СКОРОСТНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ДО 2035 ГОДА

Сегодня: 5,1 тысяча километров
скоростных дорог

Это менее 10% федеральных дорог
или менее чем 0,3% от общей
протяженности дорог в России

2,5 тыс. км образуют сеть
(находятся в доверительном управлении
Государственной компании «Автодор»)

2,6 тыс. км – разрозненные участки
длиной до 20-50 км (находятся в ведении
Федерального дорожного агентства)

Мы предлагаем:

Что?

Создать современную сеть скоростных
автомобильных дорог Российской Федерации

Зачем?

Безопасно, быстро, комфортно перемещаться
на автомобильном транспорте

«Сделать ближе» работу, дом, отдых

Создать условия для повышения мобильности,
качества жизни, деловой активности

Что получим в итоге?

Более 17 тыс. км – сеть скоростных
автомобильных дорог (IA и IB категории) и дорог II категории
(в перспективе – скоростные)

Скоростными дорогами будет «охвачено» 44 региона
Российской Федерации, где проживает 75% населения страны,
и на долю которых приходится 72% общероссийского валового
регионального продукта



Рисунок 2. Карта перспективной автотранспортной системы на территории РФ²

Figure 2. Map of the prospective road transport system in the Russian Federation²

² Появилась схема высокоскоростной магистрали, которая пройдет через Омск [Электронный ресурс]. — URL: <https://omskinform.ru/news/136307> (дата обращения: 22.06.2024).

Ключевые направления научных исследований в сфере развития мирового тоннелестроения

Key research areas in the world tunnel construction development

В современных условиях научно-исследовательские работы, рассмотренные в контексте выбранной тематики данной статьи [1–20], посвящены таким ключевым направлениям, как:

1. Улучшение процесса выбора объёмно-планировочных решений для конструирования различных тоннелей в зависимости от их типа (городские, водные, горные), учитывая географическое размещение данной масштабной конструкции, геологические особенности территории, земельных ресурсов, грунта, транспортно-логистические условия функционирования тоннеля, а также градостроительные особенности территориальной единицы.

2. Анализ и оценка результативности прогрессивных решений в конструировании тоннелей на базе постоянной обделки, в частности, разные оболочки из бетонных смесей с одновременным скальным анкером, возведением арок, сборных обделок из железобетонных блоков, которые в стыках можно регулировать, стальных обделок, комбинированных конструкций, обделок, при которых применялись прорывные технологии и композиционные строительные материалы.

3. Последующее развитие и практическое применение статических и динамических методических приёмов для выявления индикаторов несущих строительных конструкций при взаимодействии тоннеля с земельными ресурсами на разных стадиях эксплуатации строительного объекта и его производства.

4. Формирование методологических основ, а также модульных программ, способных автоматизировать процессы проектирования тоннелей при помощи современных цифровых технологий.

5. Моделирование деформаций и движений поверхности почвы, подземных инженерно-технических коммуникаций, сооружений и зданий в наземном пространстве, причиной которых выступает прохождение тоннеля транспортными средствами.

6. Перспективное развитие горных методов в тоннелестроении при полускальных либо скальных массивах грунта, практическое использование прогрессивных технологий формирования методов в тоннелестроении, оптимальных типов опережающих и контурных крепей с одновременным применением прорывных инноваций проходки в тоннелестроении, которая обеспечивает крайне высокое значение прироста, уменьшение стоимостных характеристик выполняемых строительных работ.

7. Расширение сфер практического осуществления проходки в тоннелестроении за счёт использования щитов и механизированных комплексов в различных массивах грунта посредством интеграции инновационных видов щитов и механизированных комплексов, включающих многодисковые роторы и базовые элементы, пригрузочную камеру, которая под горным давлением заполняется специальной суспензией, щиты-экраны, посредством которых можно реализовать проходку в тоннеле в двух направлениях: по вертикали и по горизонтали, механизированные комплексы в тоннелестроении. Выявление оптимальных значений технических индикаторов проходки в тоннелестроении, технического оборудования, используемого в составе механизированного комплекса.

8. Формирование и интеграция инновационных типов гидроизоляционного оборудования в тоннелестроении на базе жидких составов, многослойного сырья, герметичных уплотнителей (рис. 3).

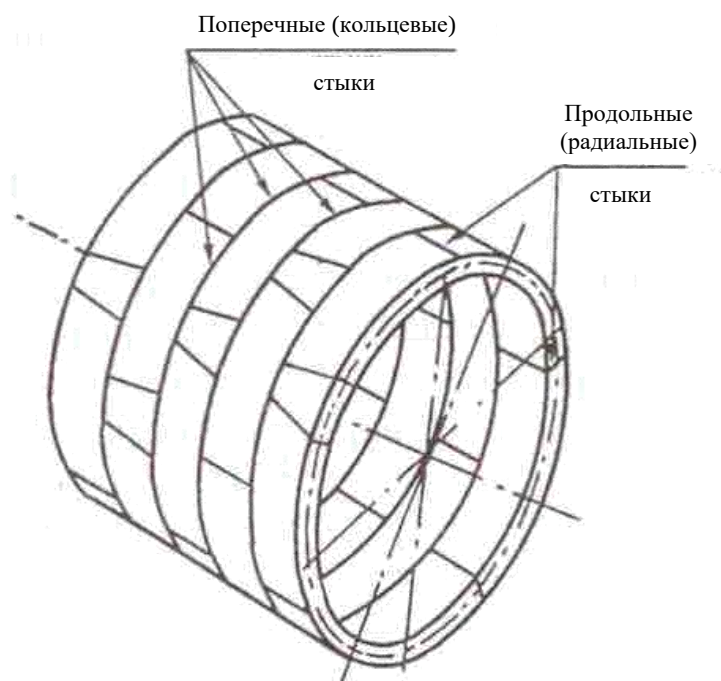


Рисунок 3. Проверка стыков в тоннеле при помощи инновационных типов гидроизоляционного оборудования в тоннелестроении [7]

Figure 3. Tunnel joint line inspection using innovative types of waterproofing equipment in tunnel construction [7]

9. Увеличение результативности и степени безопасности тоннелестроения при городской застройке при помощи полуоткрытых и открытых методов, учитывая практическое использование оптимальных типов крепи, например, армированных свай, грунтовых нагелей, буровых свай, интеграции прогрессивных технологий посредством таких методов, как: опертый свод, рамная крепь, в работу кранового оборудования (рис. 4).

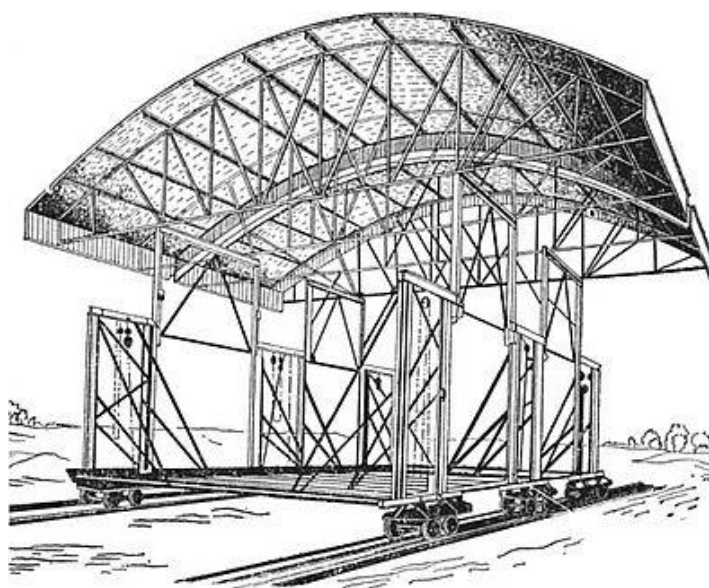


Рисунок 4. Практическое применение передвижной опалубки в тоннелестроении (источник: https://kursizdat.ru/index.php?route=product/product&product_id=986. Автор: О.Э. Дружинина)

Figure 4. Practical application of mobile formwork in tunnel construction (source: https://kursizdat.ru/index.php?route=product/product&product_id=986. Author: O.E. Druzhinina)

10. Аргументация практического применения прогрессивных технологий продавливания тоннелей в целом либо их определенных участков в сочетании с установленными искусственными барьерами, уточнение методического подхода к выявлению мер продавливания и детерминантов сопротивления данному процессу в целях дальнейшего использования разных интерпретаций одного и того же метода к запланированным условиям выполняемых строительных работ.

11. Анализ и оценка многосекционного взаимодействия водных тоннелей с потоком ресурсов на этапе выполнения конкретных строительных работ, формирование методических подходов к выявлению индикаторов технических секций на определенные влияния, обеспечение стабильности водных элементов тоннеля до начала опускания секций в водные ресурсы.

12. Формирование методического подхода к вычислению технологических индикаторов специальных способов устойчивости массивов грунтов в тоннелестроении:

- искусственное замораживание;
- компенсационное нагнетание;
- водопонижение;
- струйная цементация.

13. Улучшение средств и методов инженерно-технических поисков при выполнении работ в тоннелестроении, в частности, экологических, геологических и геодезических, на базе прогрессивных технологий, применения компьютерных инноваций, космических и аэросъёмки, а также методов выполнения геодезических работ.

14. Плановое развитие автоматизированных, инновационных систем отслеживания состояния с учётом напряжённости оперативного менеджмента строительных работ, возможных деформаций массивов грунта, которые будут влиять на дорожный тоннель, отслеживания экологических, геологических и геодезических характеристик в ходе конструирования тоннелей и их последующего эксплуатирования.

15. Формирование рекомендательных направлений по увеличению уровня долговечности, надёжности и безопасности при эксплуатировании сооружений тоннелестроения. Улучшение методического подхода к выявлению индикаторов технических систем, например, освещения, вентиляции, водоотведения, практическому применению технического оборудования, которое способно обеспечить уровень безопасности автомобильного и железнодорожного движения. Оценка риск-факторов и суммарного значения рисков, появляющихся в процессе эксплуатирования городских и автомобильных тоннелей, создание рекомендательных направлений, позволяющих предотвратить возникновение аварийной ситуации, а также ликвидировать отрицательные последствия.

Экспериментальные и теоретические методы в проведении современных научно-исследовательских работ в сфере тоннелестроения

Experimental and theoretical methods in conducting modern research work in the field of tunnel construction

Научно-исследовательские работы, в которых отражены результаты анализа тоннелестроения на стадиях проектирования, осуществления строительных работ, эксплуатирования, обусловлены применением многообразия методических приёмов, условно подразделяемых на экспериментальные и теоретические.

Теоретическими методами научно-исследовательских работ выступали нижеследующие:

1. Эмпирические методы.
2. Численные методы.
3. Аналитические методы.
4. Методы информационного моделирования или BIM методы (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Содержание теоретических методов
научно-исследовательских работ в сфере тоннелестроения

Content of theoretical methods of research
and development works in the field of tunnel construction

Группа теоретических методов <i>Group of theoretical methods</i>	Содержание их практического применения <i>The content of their practical application</i>
Эмпирические методы <i>Empirical methods</i>	Практическое применение в научно-исследовательской работе предположений, комплекса механических характеристик массивов грунта, строительного и механического оборудования <i>Practical application in research work of assumptions, a set of mechanical characteristics of soil masses, construction and mechanical equipment</i>
	Эмпирические методы подразумевают под собой приближенные, используемые преимущественно на стадии сценарного проектирования итогового продукта — тоннеля <i>Empirical methods imply approximate methods used mainly at the stage of scenario design of the final product — the tunnel</i>
Численные методы <i>Numerical methods</i>	Группа методов, которые применяются в научно-исследовательских работах по отношению к граничным составляющим, конечным составляющим, дискретным составляющим <i>A group of methods that are applied in research works in relation to boundary components, finite components, discrete components</i>
	В современных условиях численные методы являются весьма распространёнными среди научно-исследовательских работ на фоне интенсивного развития ИКТ и компьютерных инноваций <i>In modern conditions numerical methods are very widespread among scientific research works against the background of intensive development of Information and Communications Technology and computer innovations</i>
	Численные методы подразумевают технико-математическое моделирование в пространстве, формируемом на базе проекта тоннелестроения, при практическом применении прикладных комплексов, позволяющих, в частности, создать численную модель в такой системе: «массив грунта — тоннель — городской ландшафт» <i>Numerical methods imply technical and mathematical modelling in the space formed on the basis of the tunnel construction project, with practical application of application complexes, which allow, in particular, to create a numerical model in such a system: «soil mass — tunnel — urban landscape»</i>
Аналитические методы <i>Analytical methods</i>	Базируются на практическом применении достаточно трудного технико-математического аппарата с включением интегральных уравнений, дифференциальных уравнений, с использованием концептуальной модели математических функций комплексного индикатора, базовых принципов математической статистики и теории вероятностей <i>They are based on the practical application of rather difficult technical and mathematical apparatus including integral equations, differential equations, using the conceptual model of mathematical functions of complex indicator, basic principles of mathematical statistics and probability theory</i>
	В современных условиях данная группа методов научно-исследовательских работ применяется в целях решения специализированных задач в сфере механического построения объектов подземного пространства <i>In modern conditions, this group of research methods is applied to solve specialised problems in the field of mechanical construction of underground space objects</i>
Методы информационного моделирования или BIM методы <i>Information modelling methods or BIM methods</i>	Модель, основанная на BIM методах, вбирает в себя комплекс характеристик (функциональных и физических), обуславливающих показатели материалоемкости, геометрической конструкции тоннелей, их воздействия на природную среду <i>The model based on BIM methods includes a set of characteristics (functional and physical), which determine the indicators of material intensity, geometric design of tunnels, and their impact on the natural environment</i>
	Полученные цифровые данные можно применять на разных стадиях тоннелестроения: при выполнении строительных работ либо на стадии эксплуатации <i>The obtained digital data can be applied at different stages of tunnel construction: during construction works or at the operation stage</i>
	Путём BIM методов формируется реальная информационная модель тоннеля, которая в последующем сравнивается с концептуальной моделью <i>BIM methods are used to create a real information model of the tunnel, which is subsequently compared with the conceptual model</i>

Составлено автором на основе [1–20] / Compiled by the author based on [1–20]

Таблица 4 / Table 4

**Содержание экспериментальных методов
научно-исследовательских работ в сфере тоннелестроения**

**Content of experimental methods of research
and development works in the tunnel construction field**

Группа экспериментальных методов <i>Group of experimental methods</i>	Содержание их практического применения <i>Content of their practical application</i>
Лабораторные методы <i>Laboratory methods</i>	Практическое применение в научно-исследовательской работе физических моделей, базирующихся на принципах уменьшенного объекта физического моделирования <i>Practical application in research work of physical models based on the principles of reduced physical modelling object</i>
	Лабораторные методы предусматривают чёткое соблюдение базовых положений концепции подобия величин, а также их размерности в разрезе механических характеристик <i>Laboratory methods provide a clear observance of the basic concept provisions of the quantities similarity, as well as their dimensionality in terms of mechanical characteristics</i>
	Практическое применение лабораторного метода основывается на его сочетании с иными методами, например, стержневые модели, центробежные концепции, оптико-поляризационные методы, методы эквивалентных материалов <i>The practical application of the laboratory method is based on its combination with other methods, e.g. rod models, centrifugal concepts, optical-polarisation methods, equivalent materials methods</i>
	Лабораторные методы способствуют грамотному изменению технических параметров физических моделей, доведения их до разрушений, что является основополагающим аспектом выявления несущей способности строительных конструкций <i>Laboratory methods contribute to the competent technical parameters modification of physical models, bringing them to failure, which is a fundamental aspect of revealing the load-bearing capacity of engineering structures</i>
Натурные методы <i>Field methods</i>	Итоговые результаты, достигнутые на базе лабораторных методов, в последующем пересчитываются для того, чтобы сформировать натурный объект <i>The final results achieved on the basis of laboratory methods are subsequently recalculated in order to form a full-scale object</i>
	Научно-исследовательские работы проводятся с использованием натурных методов на стадии выполнения строительных работ, эксплуатации конкретного участка тоннелей либо тоннелей в целом <i>Research work is carried out using full-scale methods at the stage of construction works, operation of a particular tunnel section or tunnels as a whole</i>
	В современных условиях натурные методы являются весьма распространёнными среди научно-исследовательских работ на фоне интенсивного развития ИКТ и компьютерных инноваций <i>Nowadays, full-scale methods are very widespread among research and development activities in the context of intensive development of Information and Communications Technology and computer innovations</i>
	Посредством натурных методов можно количественно измерить технические характеристики тоннелей при помощи автоматизированных технологий отслеживания <i>Full-scale methods can quantitatively measure the technical characteristics of tunnels using automated tracking technologies</i>

Составлено автором на основе [1–20] / Compiled by the author on the basis of [1–20]

Экспериментальными методами научно-исследовательских работ выступали нижеследующие:

1. Лабораторные методы.

2. Натурные методы (табл. 4).

При конструировании и строительстве достаточно сложных сооружений дорожных тоннелей осуществлялись экспериментальные научные работы, в рамках которых происходила синергия нескольких групп рассмотренных выше методов: численных, эмпирических, натурных, аналитических и лабораторных методов.

Кроме реализации научно-исследовательских работ, можно осуществлять научную поддержку и исследовательское сопровождение стадии конструирования тоннелей, для того чтобы обеспечить соответствие проектных решений нормативно-законодательным требованиям и положениям, стадии выполнения строительных работ, в частности, реализацию работ по отслеживанию технических и конструкторских переменных для их соответствия запланированным решениям и параметрам. В соответствии с конечными результатами научно-исследовательских работ формируются рекомендательные направления, применяемые в дальнейшем на разных стадиях (конструирование, выполнение строительных работ, эксплуатирование), а также в процессе внесения изменений в действующих и новых законодательных актах.

Выводы

Conclusions

Резюмируя вышеизложенное, целесообразно отметить, что историческая ретроспектива отраслевого сектора тоннелестроения обусловлена тремя историческими стадиями: этап I: расцвет Древней Римской Империи и Древней Греции, период Древнего мира; этап II: Средневековье и заканчивая XVIII веком; этап III: с XIX века и по настоящее время. На каждой из перечисленных стадий были достигнуты определенные результаты, которые в дальнейшем повлияли на мировое тоннелестроение, современное состояние и перспективные направления научно-исследовательских работ, проводимых экспертами в сфере тоннелестроения.

В международном сообществе на этапе проектирования и практического осуществления находится многообразие инициатив, способствующих развитию строительного сектора, транспортной логистики, в частности, масштабное строительство различных тоннелей (городских, водных, горных). Перспективным направлениям международного тоннелестроения и строительства транспортных путей также способствует активное функционирование компаний-производителей оборудования и технических устройств для конструирования тоннелей.

Было установлено, что ключевыми направлениями научных исследований в сфере развития мирового тоннелестроения выступают: улучшение процесса выбора объёмно-планировочных решений для конструирования различных тоннелей в зависимости от их типа (городские, водные, горные), учитывая географическое размещение данной масштабной конструкции, геологические особенности территории, земельных ресурсов, грунта, транспортно-логистические условия функционирования тоннеля, а также градостроительные особенности территориальной единицы; анализ и оценка результативности прогрессивных решений в конструировании тоннелей на базе постоянной обделки, в частности, разные оболочки из бетонных смесей с одновременным скальным анкером, возведением арок, сборных обделок из железобетонных блоков, которые в стыках можно регулировать, стальных обделок, комбинированных конструкций, обделок, при которых применялись прорывные технологии и композиционные строительные материалы; последующее развитие и практическое применение статических и динамических методических приёмов для выявления индикаторов несущих строительных конструкций при взаимодействии тоннеля с земельными ресурсами на разных стадиях эксплуатации строительного объекта и его производства; формирование методологических основ, а также модульных программ, способных автоматизировать процессы проектирования тоннелей при помощи современных цифровых технологий; моделирование деформаций и движений поверхности почвы, подземных инженерно-технических коммуникаций, сооружений и зданий в наземном пространстве, причиной которых выступает прохождение тоннеля транспортными средствами; перспективное развитие горных методов в тоннелестроении при полускальных либо скальных массивах грунта, практическое использование прогрессивных технологий формирования методов в тоннелестроении, оптимальных типов опережающих и контурных крепей с одновременным применением прорывных инноваций проходки в тоннелестроении, которая обеспечивает крайне высокое значение прироста, уменьшение стоимостных характеристик выполняемых строительных работ и др.

Постепенно сфера тоннелестроения становится в индустриальном сообществе наукоемким сектором, обусловлена масштабным практическим применением инновационно-цифровых технологий на базе экономичных строительных конструкций, высокопроизводительных механизированных и автоматизированных комплексов, инновационных строительных материалов, оптимальных методов выполнения строительных работ, что обеспечивает достаточно высокое значение прироста в строительном секторе с учётом соблюдения экологической и технической безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Юренкова, Л.Р.** Из истории подводного тоннелестроения в России / Л.Р. Юренкова, Д.Е. Платонов, И.А. Никитин // Главный механик. — 2020. — № 6. — С. 65–70. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43859136>. — EDN NWLVUT. (дата обращения: 23.06.2024).
2. **Тимофеева, М.А.** Тенденции освоения подземного пространства городов в связи с растущей автомобилизацией / М.А. Тимофеева, К.В. Романевич, И.В. Поцешковская // Метро и тоннели. — 2021. — № 2. — С. 38–42. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45798582>. — EDN XAMSSR. (дата обращения: 23.06.2024).
3. **Меркин, В.Е.** Зарубежная практика управления рисками в тоннелестроении / В.Е. Меркин, В.В. Космин, М.Г. Зерцалов, Д.Ю. Чунюк // Транспортное строительство. — 2021. — № 1. — С. 28–32. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45742624>. — EDN QBLCRJ. (дата обращения: 23.06.2024).
4. **Маковский, Л.В.** Применение опережающей бетонной крепи в тоннелестроении / Л.В. Маковский, В.В. Кравченко // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2020. — № 2. — С. 19–21. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43825367>. — EDN NCFGTF. (дата обращения: 23.06.2024).
5. **Дорман, И.Я.** ТАР сегодня — это штаб отечественного "метро тоннелестроения" / И.Я. Дорман // Метро и тоннели. — 2020. — № 1. — С. 14–15. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42524776>. — EDN LEFJZV. (дата обращения: 23.06.2024).
6. **Qiao, W.** Deep learning-based pixel-level rock fragment recognition during tunnel excavation using instance segmentation model / W. Qiao, Y. Zhao, Y. Xu, Y. Lei [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104072> // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2021. — Т 115. — С. 104072. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779821002637>. (дата обращения: 23.06.2024).
7. Применение прогрессивных технологий тоннелестроения при освоении подземного пространства мегаполисов (Итоги форума, проведенного Тоннельной ассоциацией России) / В.В. Внутских, Д.С. Конохов, А.А. Долев [и др.] // Метро и тоннели. — 2020. — № 4. — С. 8–12. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44324235>. — EDN MBMMHS. (дата обращения: 23.06.2024).
8. **Опацких, А.Н.** Инновационные технологии в тоннелестроении / А.Н. Опацких, В.М. Былым. — DOI https://doi.org/10.46973/9785907295612_2022_120 // Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры: Сборник научных трудов IV Всероссийской национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 11 апреля 2022 года / Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. — С. 120–123. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49331961>. — EDN WGNSCB. (дата обращения: 23.06.2024).
9. **Aygar, E.B.** Evaluation of new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel's weak rocks / E.B. Aygar. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.011> // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2020. — Т 12. — № 3. — С. 541–556. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775520300469>. (дата обращения: 23.06.2024).
10. **Кильдишев, Е.Ф.** Особенности строительства тоннелей в горной местности при сложных климатических условиях / Е.Ф. Кильдишев, А.В. Адер // Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития: Материалы VI Международной научно-исследовательской конференции, посвященной 50-летию Самарского государственного университета путей сообщения, Самара-Оренбург, 18–19 апреля 2023 года / Самара-Оренбург: ОрИПС-филиал СамГУПС в г. Оренбург, 2023. — С. 110–111. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54214793&pff=1>. — EDN PPFQJJ. (дата обращения: 23.06.2024).
11. **Маковский, Л.В.** Опережающая забойная крепь из фибергласовых нагелей / Л.В. Маковский, В.В. Кравченко // Метро и тоннели. — 2020. — № 4. — С. 16–18. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44324237>. — EDN LFKSRK. (дата обращения: 23.06.2024).
12. **Александров, В.А.** Дело наше живет и развивается (интервью к 30-летию Тоннельной ассоциации России) / В.А. Александров // Метро и тоннели. — 2020. — № 1. — С. 12–13. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42524775>. — EDN KUXSPK. (дата обращения: 23.06.2024).
13. **Mahmoodzadeh, A.** Forecasting maximum surface settlement caused by urban tunneling / A. Mahmoodzadeh, M. Mohammadi, A. Daraei, H. Farid Hama Ali — DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103375> // Automation in Construction. — 2020. — Т 120. — С. 103375. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580520309559>. (дата обращения: 23.06.2024).

14. **Rehman, H.** Numerical evaluation of new Austrian tunneling method excavation sequences: A case study / H. Rehman, A.M. Naji, W. Ali, M. Junaid [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.009> // International Journal of Mining Science and Technology. — 2020. — Т 30. — № 3. — С. 381–386. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268619301090>. (дата обращения: 23.06.2024).
15. **Sousa, R.L.** Lessons from accidents during tunnel construction / R.L. Sousa, H.H. Einstein — DOI <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103916> // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2021. — Т 113. — С. 103916. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779821001073>. (дата обращения: 23.06.2024).
16. **Вознесенский, А.С.** Опыт прогнозирования и мониторинга износа режущего инструмента в абразивных грунтах при механизированной щитовой проходке тоннелей / А.С. Вознесенский, С.В. Мазеин, Г.В. Данилов // Метро и тоннели. — 2020. — № 4. — С. 19–25. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44324238>. — EDN YSWYRO. (дата обращения: 23.06.2024).
17. **Ледяев, А.П.** Анализ статической работы сборной обделки многофункционального тоннеля большого диаметра методом конечных элементов в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / А.П. Ледяев, В.Н. Кавказский, Т.В. Иванес // Метро и тоннели. — 2020. — № 3. — С. 22–26. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43927694>. — EDN GWXUCW. (дата обращения: 23.06.2024).
18. Система комплексного автоматизированного геотехнического мониторинга и опыт ее применения при строительстве подземных сооружений / В.Е. Меркин, А.А. Пичугин, Г.М. Медведев [и др.] // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2021. — № 3. — С. 17–21. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46397800>. — EDN REPMSР. (дата обращения: 23.06.2024).
19. **Маковский, Л.В.** Применение контрфорсных "стен в грунте" / Л.В. Маковский, В.В. Кравченко, Н.А. Сула // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2020. — № 4. — С. 4–6. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44432135>. — EDN QGFFOD. (дата обращения: 23.06.2024).
20. **Peña-García, A.** Sustainable tunnel lighting: One decade of proposals, advances and open points / A. Peña-García. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104227> // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2022. — Т 119. — С. 104227. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779821004181>. (дата обращения: 23.06.2024).

Сведения об авторах:

Куровский Станислав Валерьевич — руководитель научно-исследовательского подразделения, ООО «Высшая Школа Образования», Москва, Россия, e-mail: 8917564@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=921032

Соснин Дмитрий Андреевич — ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, e-mail: traph-perm@yandex.ru

Мишин Денис Александрович — руководитель редакционно-издательского отдела, ООО «Высшая Школа Образования», Москва, Россия, e-mail: 9651530@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1012222

Статья получена: 28.06.2024. Принята к публикации: 24.10.2024. Опубликовано онлайн: 01.11.2024.

REFERENCES

1. Yurenkova L.R., Platonov D.E., Nikitin I.A. From the History of Underwater Tunneling in Russia. *Glavnyy Mekhanik*. 2020;(6): 65–70. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43859136> (accessed 23rd June 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Timofeyeva M.A., Romanevich K.V., Potseshkovskaya I.V. [Trends in the development of underground urban space in connection with the growing motorization]. *Metro and tunnels*. 2021;(2): 38–42. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45798582> (accessed 23rd June 2024). (In Russ.).
3. Merkin V.E., Kosmin V.V., Zertsalov M.G., Chunjuk D.Yu. Foreign Risk Management Practices in Tunnelling. *Transport construction*. 2021;(1): 28–32. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45742624> (accessed 23rd June 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

4. Makovsky L., Kravchenko V. Application of Leading Concrete Support in Tunneling. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2020;(2): 19–21. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43825367> (accessed 23rd June 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Dorman I.Ya. [TAR today is the headquarters of the domestic "metro tunnel construction"]. *Metro and tunnels*. 2020;(1): 14–15. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42524776> (accessed 23rd June 2024). (In Russ.).
6. Qiao W., Zhao Y., Xu Y., Lei Y. et al. Deep learning-based pixel-level rock fragment recognition during tunnel excavation using instance segmentation model. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;115: 104072. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104072>.
7. Vnitskikh V.V., Konyukhov D.S., Dolev A.A. et al. [Application of progressive tunneling technologies in the development of underground space in megacities (Results of the forum held by the Tunnel Association of Russia)]. *Metro and tunnels*. 2020;(4): 8–12. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44324235> (accessed 23rd June 2024). (In Russ.).
8. Opatskikh A.N., Bylym V.M. Innovative Technologies in Tunnel Construction. In: [Innovative technologies in construction and management of the technical condition of infrastructure. Collection of scientific papers of the IV All-Russian national scientific and practical conference, Rostov-on-Don, April 11, 2022]. Rostov-on-Don: Rostov State University of Railway Engineering; 2020. p. 120–123. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49331961> (accessed 23rd June 2024). (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.46973/9785907295612_2022_120.
9. Aygar E.B. Evaluation of new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel's weak rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020;12(3): 541–556. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.011>.
10. Kil'dishev E.F., Ader A.V. Features of Construction of Tunnels in Mountain Terrain Under Difficult Climatic Conditions. In: [Youth Science in the 21st Century: Traditions, Innovations, Development Vectors: Proceedings of the VI International Research Conference dedicated to the 50th Anniversary of Samara State Transport University, Samara-Orenburg, April 18–19, 2023]. Samara-Orenburg: Branch of Samara State University of Railways in Orenburg; 2023. p. 110–111. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54214793&pf=1> (accessed 23rd June 2024). (In Russ.).
11. Makovsky L.V., Kravchenko V.V. Leading Bottom Fastener from Fiberglass Nagels. *Metro and tunnels*. 2020;(4): 16–18. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44324237> (accessed 23rd June 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Aleksandrov V.A. [Our business lives and develops (interview for the 30th anniversary of the Tunnel Association of Russia)]. *Metro and tunnels*. 2020;(1): 12–13. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42524775> (accessed 23rd June 2024). (In Russ.).
13. Mahmoodzadeh A., Mohammadi M., Daraei A., Farid Hama Ali H. et al. Forecasting maximum surface settlement caused by urban tunneling. *Automation in Construction*. 2020;120: 103375. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103375>.
14. Rehman H., Naji A.M., Ali W., Junaid M. et al. Numerical evaluation of new Austrian tunneling method excavation sequences: A case study. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(3): 381–386. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.009>.
15. Sousa R.L., Einstein H.H. Lessons from accidents during tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;113: 103916. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103916>.
16. Voznesenskii A.S., Mazein S.V., Danilov G.V. Experience in Prediction and Monitoring of The Cutting Tool Wear in Abrasive Soils with Mechanized Shield Tunneling. *Metro and tunnels*. 2020;(4): 19–25. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44324238> (accessed 23rd June 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
17. Ledyayev A.P., Kavkazskiy V.N., Ivanov T.V. [Analysis of static performance of prefabricated lining of large-diameter multifunctional tunnel using finite element method in engineering-geological conditions of Saint Petersburg]. *Metro and tunnels*. 2020;(3): 22–26. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43927694> (accessed 23rd June 2024). (In Russ.).
18. Merkin V.E., Pichugin A.A., Medvedev G.M. et al. Comprehensive Automated Geotechnical Monitoring System and Experience in its Application in the Construction of Underground Facilities. *Soil Mech Found Eng*. 202;58: 230–236. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09733-z>.

19. Makovskiy L.V., Kravchenko V.V., Sula N.A. Application of Constructions “Walls in the Ground”. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2020;(4): 4–6. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44432135> (accessed 23rd June 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
 20. Peña-García A. Sustainable tunnel lighting: One decade of proposals, advances and open points. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022;119: 104227. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104227>.
-

Information about the authors:

Stanislav V. Kurovsky — Higher School of Education, Moscow, Russia, e-mail: 8917564@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=921032

Dmitry A. Sosnin — Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: traph-perm@yandex.ru

Denis A. Mishin — Higher School of Education, Moscow, Russia, e-mail: 9651530@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1012222

Submitted: 28th June 2024. Revised: 24th October 2024. Published online: 1st November 2024.