

# КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТОННЕЛЯ СВЕРХБОЛЬШОГО ДИАМЕТРА, СООРУЖАЕМОГО ПОД РЕКОЙ ХУАНХЭ ЩИТОВЫМ СПОСОБОМ И ПОДВЕРЖЕННОГО ВЫСОКИМ ПЕРЕМЕННЫМ НАГРУЗКАМ

Принята к публикации 30.05.2025

Опубликована: 16.06.2025

ЧЭНЬ Цз.

Институт проектирования городских транспортных и подземных сооружений, компания «Шанхайский муниципальный инженерно-проектный институт», г. Шанхай, Китай 897229441@qq.com

## АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный адаптированный перевод статьи «Ключевые технологии повышения устойчивости тоннеля сверхбольшого диаметра, сооружаемого под рекой Хуанхэ щитовым способом и подверженного высоким переменным нагрузкам», автором которой является китайский геотехник Цзянь Чэн (Chen, 2024). Она была опубликована в 2024 году в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Исходно это был доклад, сделанный на международной конференции «ГеоШанхай-2024» (GeoShanghai-2024) в секции «Тоннелестроение и подземное строительство». Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Chen, 2024) приводится в конце.

На строительство и эксплуатацию подземных сооружений могут оказывать значительное влияние условия окружающей среды, резкие изменения которых могут приводить к повреждениям. В данной статье анализируются механические характеристики обделки тоннеля с внешним диаметром 16,8 м, сооружаемого щитовым способом под рекой Хуанхэ в городе Цзинань на дороге Цзинань – Хуанган, при учете проблемы больших переменных нагрузок на тоннель на этапе эксплуатации вследствие внутриречевой эрозии и накопления отложений на дне реки, крупномасштабного увеличения высоты береговых дамб и сезонных изменений уровня грунтовых вод. В связи с этим в статье рассматриваются рекомендованные ключевые технологии для повышения устойчивости конструкций этого сооружения. Результаты использования предложенных технологий могут помочь в строительстве не только указанного тоннеля сверхбольшого диаметра, но и других подобных сооружений по дну рек, озер и морей.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

автодорожный тоннель; щитовая проходка; перегрузка; переменные нагрузки; устойчивость тоннеля; контроль деформаций; сталефибробетонная обделка тоннеля; усиленные соединения; река Янцзы; город Цзинань.

## ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Чэнь Цз. Ключевые технологии повышения устойчивости тоннеля сверхбольшого диаметра, сооружаемого под рекой Хуанхэ щитовым способом и подверженного высоким переменным нагрузкам (пер. с англ.) // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 1. С. 76–83. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-76-83.

# KEY TECHNOLOGIES FOR IMPROVING RESILIENCE OF SUPER-LARGE DIAMETER SHIELD TUNNEL AFFECTED BY LARGE VARIABLE LOADS UNDERNEATH THE YELLOW RIVER

Accepted for publication 30.05.2025

Published 16.06.2025

CHEN J.

Urban Traffic and Underground Space Design Institute, Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai, China  
897229441@qq.com

## ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper "Key technologies for improving resilience of super-large diameter shield tunnel affected by large variable loads underneath the Yellow River" by Jiang Chen, Chinese geotechnician (Chen, 2024). It was published in 2024 in the journal "Earth and Environmental Science" by the publishing company of the British scientific society "Institute of Physics" (IOP) that is now virtually international. It is an open access paper under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Chen, 2024), which was used for the presented translation, is given in the end.

Environmental conditions may have a significant impact on the construction and operation of underground works, and sudden changes in environmental conditions may lead to underground engineering damage. Considering the Yellow River crossing tunnel on Huanggang Road in Jinan as an example, this paper analyzes the mechanical performance of the lining of the shield tunnel with an external diameter of 16.8 m, which faces the challenge of large variable loads in the operation stage, such as deep riverbed erosion and deposition, large-scale heightening of the river embankments, seasonal changes in the groundwater level, and key technologies for improving the resilience of tunnel structure are proposed accordingly. The results can not only assist in the construction of the super-large-diameter shield tunnel project in Jinan City but also provide some technical support for other shield tunnel projects crossing rivers, lakes, and seas.

## KEYWORDS:

road tunnel; shield tunnelling; overloading; variable loads; tunnel stability; tunnel lining; deformation control; steel-fiber-reinforced concrete; reinforced joints; Yellow River; Jinan City.

## FOR CITATION:

Chen J. Klyuchevye tekhnologii povysheniya ustoichivosti tonnelya sverkhbol'shogo diametra, sooruzhaemogo pod rekoi Khuankheh shchitovym sposobom i podverzhennogo vysokim peremennym nagruzkam [Key technologies for improving resilience of super-large diameter shield tunnel affected by large variable loads underneath the Yellow River] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 1. S. 76-83. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-76-83 (in Rus.).

## ВВЕДЕНИЕ ►

Развитие экономики и общества Китая в последнее время, в дополнение к быстрой урбанизации, увеличило спрос на автодорожные тоннели под дном рек, озер и морей. Ключом к успеху крупномасштабного проекта с огромными инвестициями и высокими рисками является технология, выбранная на этапе проектирования. В настоящее время есть три основных способа сооружения тоннелей для преодоления водных препятствий: траншнейный (открытый); закрытый путем щитовой проходки; из погружных/опускных секций.

Широкое внедрение технологии щитовой проходки в создание автодорож-

ных и железнодорожных тоннелей в таких городах, как Шанхай, Гуанчжоу, Нанкин и Ухань, в том числе Шанхайского [1, 2], Уханьского [3] и Нанкинского [4] тоннелей через реку Янцзы, привело к накоплению богатого опыта проектирования и строительства [5–9]. Таким образом, метод щитовой проходки стал основным выбором для тоннелей под дном рек, озер и морей.

Строительство и эксплуатация подземных сооружений имеют ограничения, связанные с условиями окружающей среды, а внезапные изменения этих условий обычно приводят к повреждениям. Например, случайная перегрузка поверхности земли над лини-

ей метро в Шанхае вызвала чрезмерную деформацию обделки тоннеля (рис. 1), что привело к растрескиванию бетона, повреждениям и сломам болтов, расхождениям стыков между секциями и проникновению воды [10]. Опасность также представляют другие строительные работы, производимые поблизости во время эксплуатации, из-за которых появляются риски, связанные с ухудшением структурных характеристик тоннелей [11–14]. Кроме того, для безопасной эксплуатации тоннелей, построенных щитовым способом, создаются проблемы внутрирудовая эрозия и сезонные изменения уровня грунтовых вод (УГВ).

Наружный диаметр тоннеля, пересекающего реку Хуанхэ (одну из самых полноводных в Китае – *Ped.*) в городе Цзинань на автодороге Цзинань – Хуанган составляет 16,8 м. Это самый большой диаметр по сравнению со всеми уже построенными и строящимися в Китае (да и во всем мире. – *Ped.*) автомобильными и железнодорожными тоннелями.

На этапе эксплуатации тоннелей приходится сталкиваться с такой проблемой, как большие переменные нагрузки, в том числе из-за глубокой внутриречевой эрозии и отложения наносов на дне реки, крупномасштабного увеличения высоты береговых дамб и сезонных изменений УГВ. Проектирование устойчивости тоннеля, проходимого щитовым способом, требует учета сочетаний геологических и экологических условий вдоль его трассы – прогнозирования неблагоприятных воздействий со стороны внешних факторов и обеспечения определенных амортизирующих свойств для облегчения ремонта и поддержания рабочих характеристик сооружения в случае ухудшения его состояния [15].

В настоящей статье анализируются механические характеристики обделки указанного тоннеля сверхбольшого диаметра



Рис. 1. Угрозы безопасности тоннеля метро в Шанхае, вызванные случайной избыточной нагрузкой на поверхность от наземного транспорта

метра в городе Цзинань, создаваемого щитовым методом, и предлагаются ключевые технологии для повышения устойчивости и обеспечения безопасности его конструкций. Полученные при

данном исследовании результаты смогут помочь в строительстве не только таких сооружений, как это, но и других тоннелей, создаваемых щитовым способом для пересечения рек, озер и морей.



Рис. 2. Изображение трассы тоннеля через реку Хуанхэ в плане

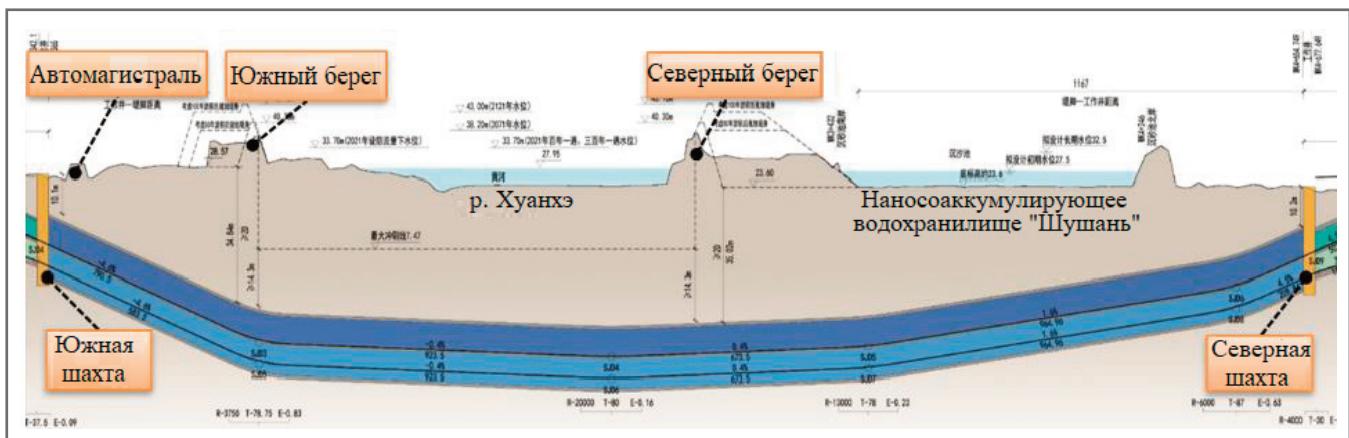


Рис. 3. Схематичный продольный разрез вдоль трассы тоннеля через реку Хуанхэ

## ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ПО ПРОЕКТУ ►

### ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ПО ТОННЕЛЮ, ПЕРЕСЕКАЮЩЕМУ РЕКУ ХУАНХЭ ►

Тоннель под рекой Хуанхэ на автодороге Цзинань – Хуанган соединяет центральные районы города Цзинань, расположенные по обе стороны реки. Тоннелепроходческий механизированный комплекс (ТПМК) будет запущен из рабочей шахты на северном берегу Хуанхэ (этот ТПМК является самым большим по диаметру в мире и имеет название «Шанхэ». – Ред.). Затем он пройдет с севера на юг под водохранилищем Шушань, рекой Хуанхэ, скоростной автомагистралью Цзинань – Гуанчжоу и некоторыми другими важными сооружениями и закончит работу, выйдя в рабочую шахту на южном берегу (проходка тоннеля началась уже после написания данной статьи 1 сентября 2024 года, строительство его части под дном реки длиной 3290 м было закончено к концу того же года, а полностью завершить строительство тоннеля общей длиной 5755 м планируется к концу 2025 года. – Ред.).

План трассы тоннеля (со схематичным поперечным разрезом. – Ред.) и его продольный разрез показаны на рисунках 2 и 3 соответственно.

Это шестиполосный тоннель с круглым сечением и двумя уровнями, имеющими по три полосы. Глубина его заложения от поверхности грунта составляет от 10,3 до 49,5 м. Его наружный диаметр, внутренний диаметр и ширина сегментного кольца равны 15,2, 13,9 и 2,0 м соответственно. Сегментное кольцо обделки тоннеля разделено на 12 блоков. Элементы соединены между собой с помощью наклонных болтов и смонтированы в шахматном порядке. Стандартное поперечное сечение тоннеля показано на рисунке 4.

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ►

Согласно отчету по инженерно-геологическим изысканиям ТПМК должен проходить в основном через слои пылеватой/илистой глины (muddy clay). Обнаружено также небольшое количество пылеватого грунта (silt), пылеватого песка (silty sand), мелкозернистого песка (silver sand) и окатанного гравия. Еще присутствуют известковые конкреции и сцементированный песок с пылеватой/илистой глиной (рис. 5, 6).

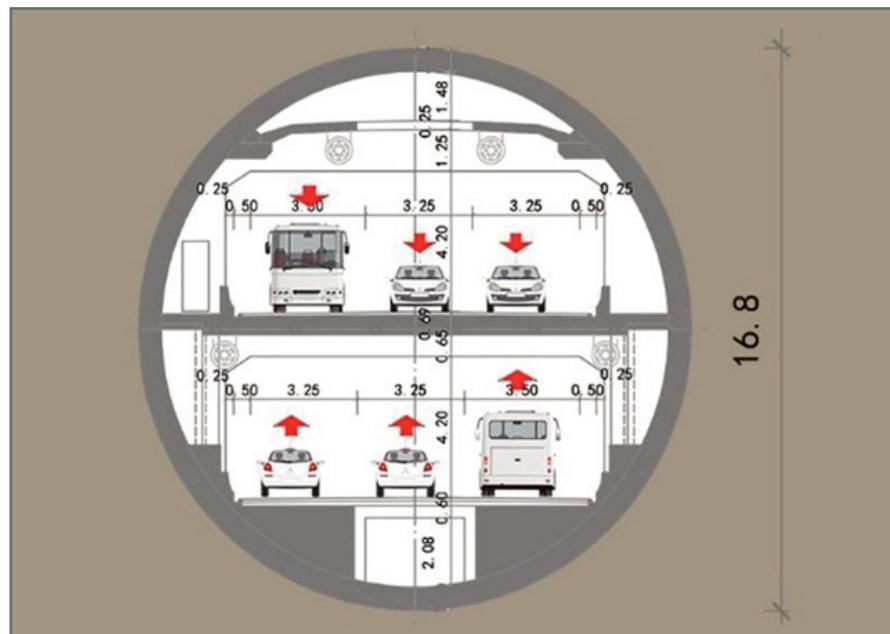


Рис. 4. Схематичное поперечное сечение тоннеля



Рис. 5. Образцы керна с известковыми конкрециями (обведены красным)



Рис. 6. Образцы керна из сцементированного песка (обведены красным)

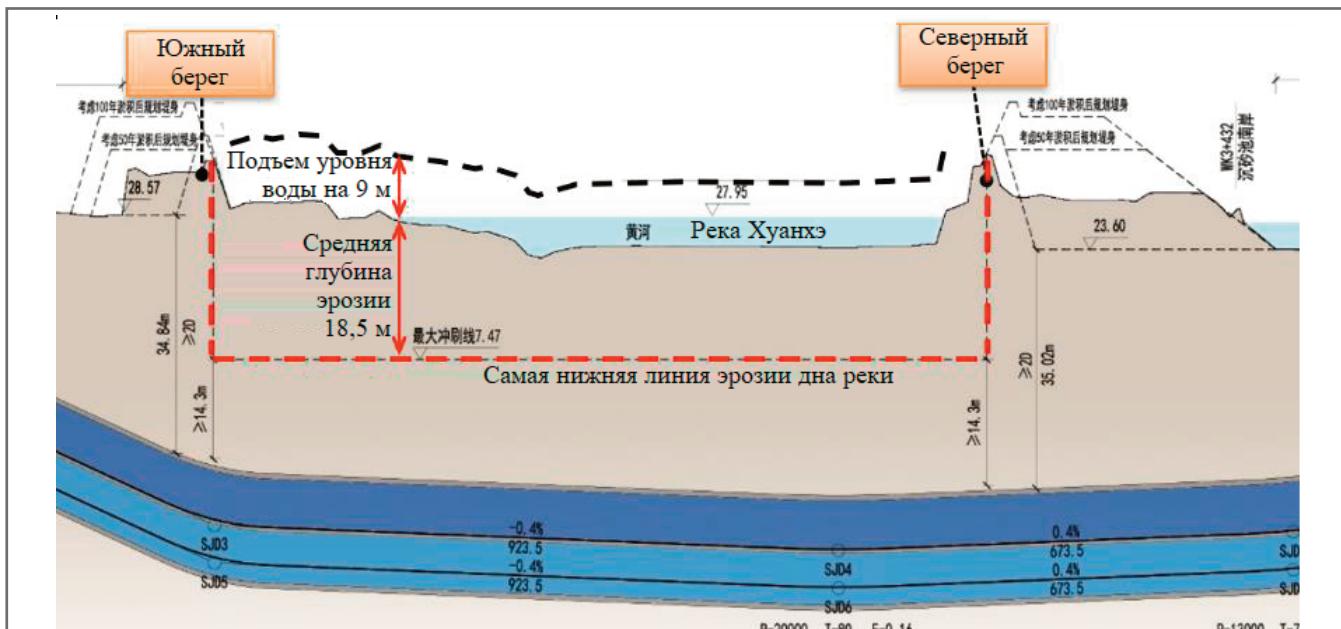


Рис. 7. Схематичный разрез, показывающий эрозию дна реки Хуанхэ и отложение на нем наносов за 100 лет

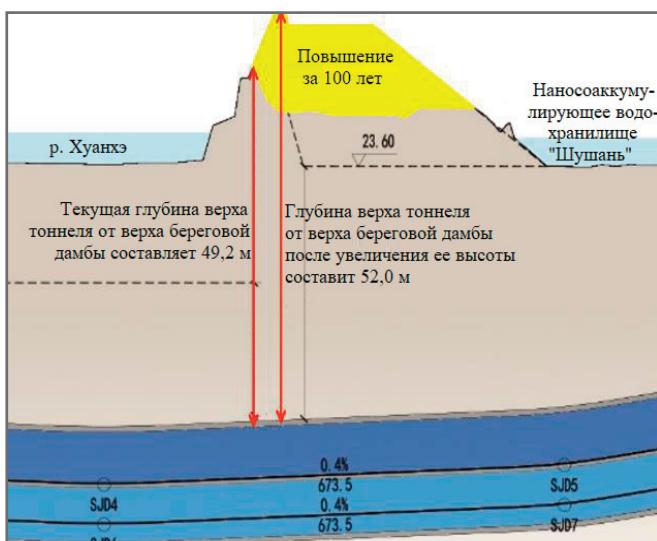


Рис. 8. Схематичный разрез, показывающий крупномасштабное увеличение высоты береговой дамбы



Рис. 9. Береговая дамба над трассой тоннеля

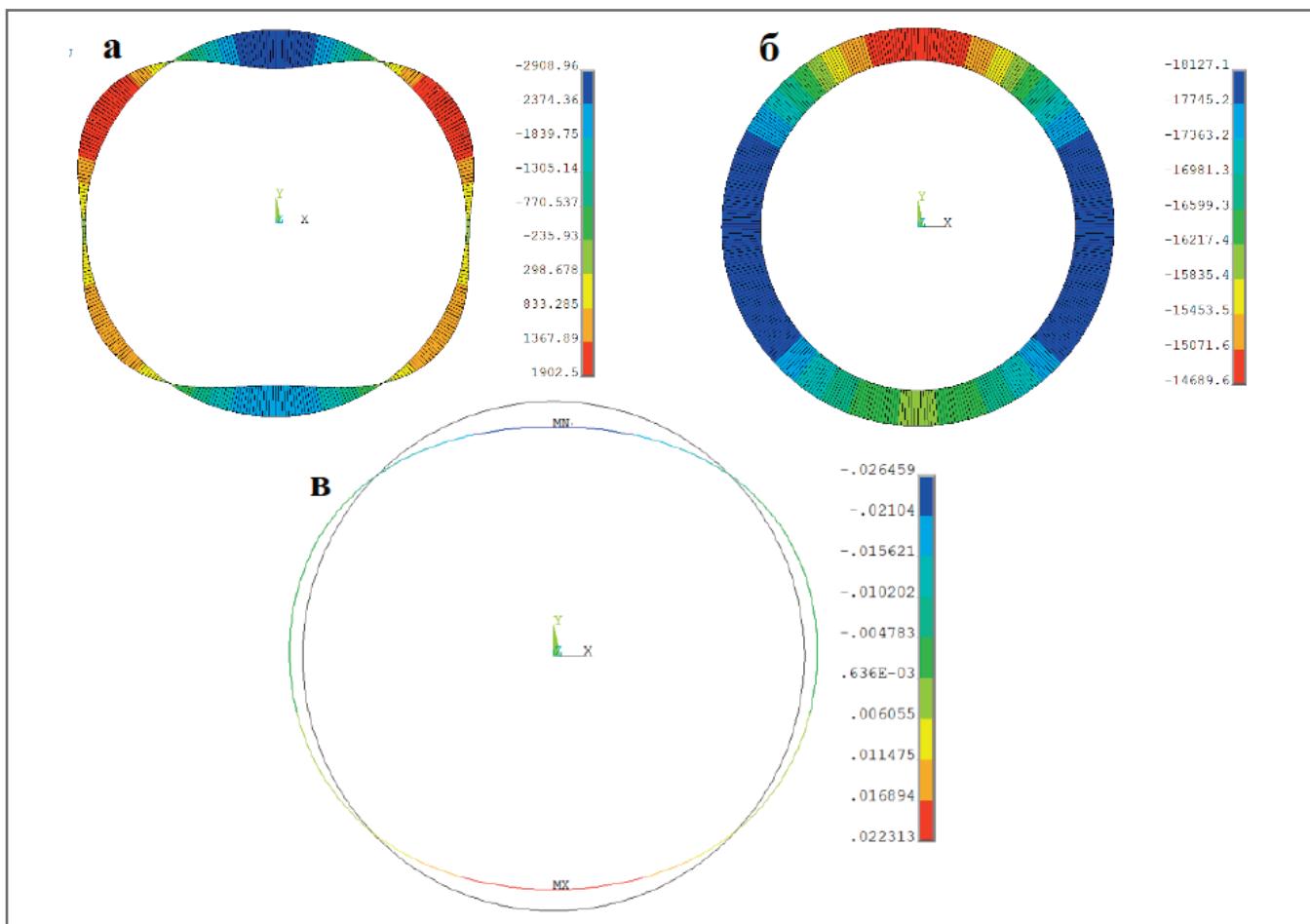
## ПРИЧИНЫ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ТОННЕЛЬ ►

Река Хуанхэ, которую в Китае называют «рекой-матушкой», характеризуется большим количеством наносов, приносимых течением сверху, что приводит к постоянному повышению речного дна и к соответствующему повышению уровня воды ниже по течению, то есть как бы сама себя поднимающая река. Поэтому проектирование строительства тоннеля через Хуанхэ на автодороге Цзинань – Хуангган с использованием ТПМК сверхбольшого диаметра сталкивается с проблемой больших переменных нагрузок.

## ГЛУБОКАЯ ВНУТРИРУСЛОВАЯ ЭРОЗИЯ И ОТЛОЖЕНИЯ НА ДНЕ РЕКИ ►

Река Хуанхэ в среднем течении протекает через Лёссовое плато, где происходит сильная эрозия грунта. В нижнем течении сток реки меньше, при этом в ее водах содержится большое количество взвешенных наносов (из-за придаваемого ими цвета Хуанхэ и получила свое название, которое в переводе означает «Желтая река». – Ред.). Согласно отчету по оценке наводнений, водохранилище Сяоланди, введенное в эксплуатацию в 1997 году, сыграло значительную роль в регулировании количества воды и наносов, что стало приводить к более быстрому воздействию

внутрирусловой эрозии по сравнению со скоростью накопления осадков на дне ниже по течению. Однако, по мере того как способность водохранилища задерживать наносы уменьшалась и, соответственно, содержание взвешенных наносов в воде ниже по течению увеличивалось, русло снова стало подвергаться значительному отложению осадков. Прогнозируется, что средняя глубина эрозии дна на участке Айшань – Лиззинь, где проходит тоннель, за 100 лет составит 18,5 м, а дно реки поднимется примерно на 9 м (поскольку теперь процессы эрозии дна и отложения на нем наносов идут параллельно, но накопление осадков происходит быстрее. – Ред.). Проблемы глубокой внутри-



**Рис. 10.** Анализ усилий и прогноз деформирования обделки участка тоннеля под северным берегом: а – изгибающие моменты; б – осевые (продольные) усилия; в – деформирование

рирусловой эрозии и отложения наносов для рассматриваемого проекта тоннеля проиллюстрированы на рисунке 7.

Эрозия дна реки и отложение на нем осадков (что эквивалентно разгрузке и пригрузке соответственно) приведут к изменению глубины залегания тоннеля. Дополнительная нагрузка вызовет тенденцию к опусканию тоннеля, а чрезмерная пригрузка может легко разрушить бетон по обе стороны арок сегментных колец. Разгрузка вызовет тенденцию к подъему тоннеля, а чрезмерная разгрузка может привести к растрескиванию или даже фрагментации обделки тоннеля из-за неизбежных смещений во время подъема сегментов. Теоретически воздействия разгрузки и пригрузки на тоннель могут компенсировать друг друга. Однако из-за непредсказуемости эрозии дна реки и отложения на нем осадков вызываемые ими нарушения станут серьезной угрозой для безопасности тоннеля.

### КРУПНОМАСШТАБНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫСОТЫ БЕРЕГОВЫХ ДАМБ ►

На основе отчетов по оценке наводнений и разрешительных документов

соответствующих органов можно сделать прогноз, что из-за отложений в русле реки Хуанхэ уровень паводковых вод на участке Айшань – Лицзинь в 2121 году составит 43 м, что будет примерно на 9 м выше текущего уровня. Для обеспечения безопасности в отношении наводнений предстоит крупномасштабное увеличение высоты береговых дамб с обеих сторон реки, что будет представлять проблему для тоннеля под Хуанхэ на этапе эксплуатации. Максимальная высота над уровнем моря на южном берегу составляет примерно 10 м, на северном – около 12 м (рис. 8). Береговая дамба над трассой будущего тоннеля была впервые построена в 1890-х годах в виде каменной наброски без свайного фундамента (рис. 9). Поэтому неблагоприятное воздействие повышения нагрузки на обделку тоннеля при увеличении высоты дамб необходимо рассматривать без каких-либо скидок. Как показывает опыт, других случаев такого крупномасштабного увеличения высоты береговых дамб над действующими тоннелями, созданными щитовым способом, до сих пор не было.

### СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ►

УГВ вдоль трассы тоннеля все время меняется из-за обмена между грунтовыми водами и водами Хуанхэ. Различия между уровнями грунтовых вод в разные времена года (например, в сезон дождей и в период маловодья) могут существенно меняться. Изменения УГВ приводят к последующим изменениям во внутренних усилиях в обделке тоннеля и к ее деформированию. Если уровень грунтовых вод меняется слишком сильно, то, соответственно, увеличивается воздействие окружающего грунта на обделку тоннеля, что может в результате привести к возникновению трещин или неравномерным деформациям. Поэтому на этапе проектирования необходимо учитывать влияние изменений УГВ на обделку тоннеля со сроком службы 100 лет.

### КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ►

В целях решения проблем, связанных с большими переменными нагрузками, рассмотренными выше, было проведено несколько исследований ме-

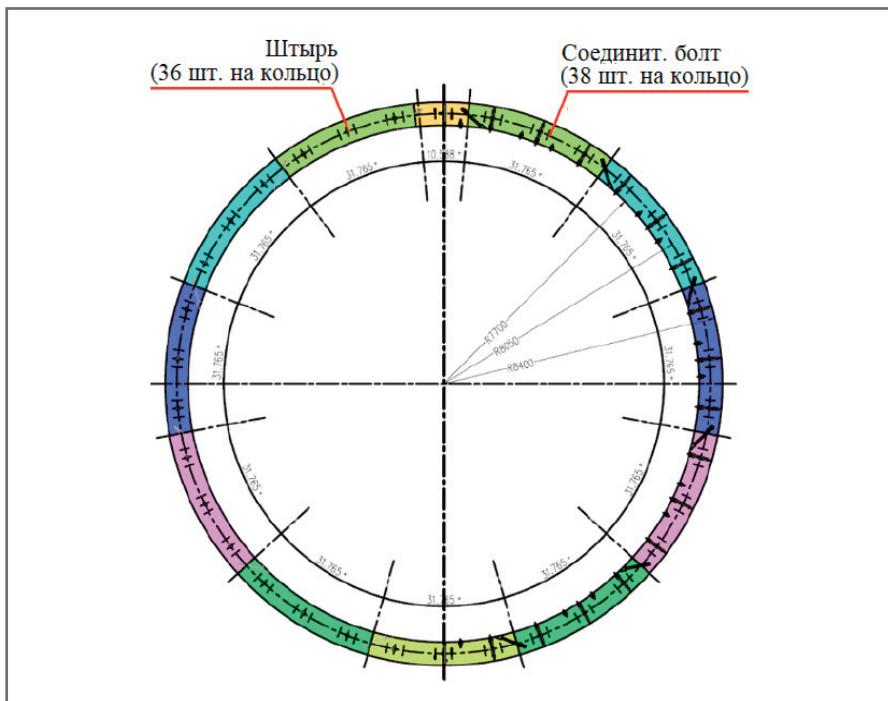


Рис. 11. Распределение штырей и болтов для соединения сегментных колец между собой

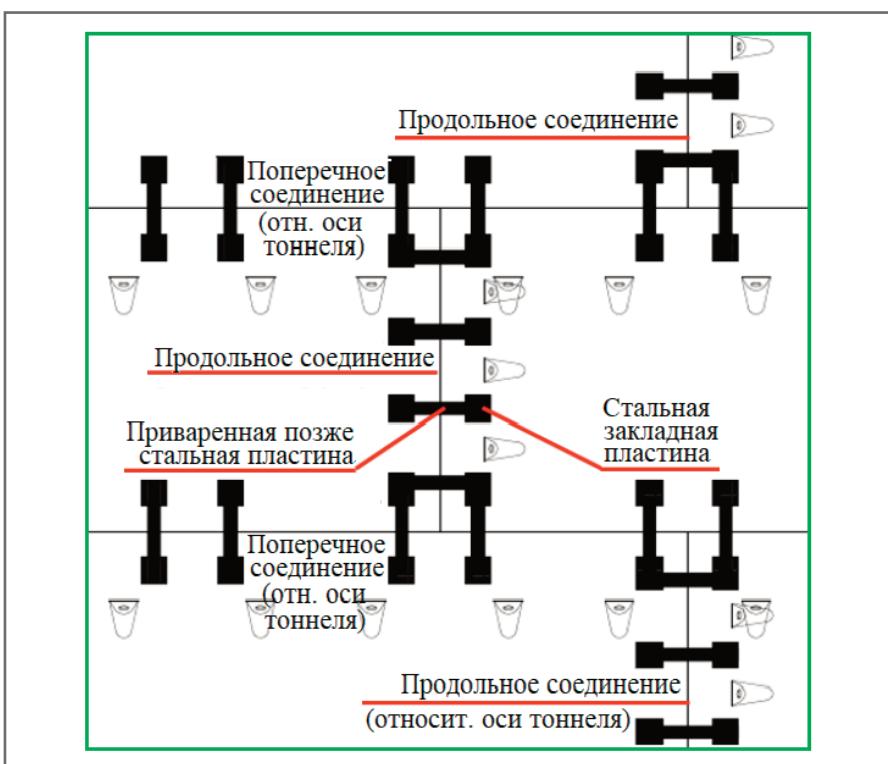


Рис. 12. Схема сварки стальных пластин для соединения блоков внутри сегментного кольца

хнических характеристик обделки тоннеля под рекой Хуанхэ и были предложены ключевые технологии повышения его устойчивости.

### УЧЕТ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ТОННЕЛЯ ПРИ АНАЛИЗЕ УСИЛИЙ ►

В процессе проектирования рассматриваемого тоннеля учитывались воздействия больших переменных нагруз-

ок в результате эрозии дна реки и накопления на нем осевших наносов, крупномасштабного увеличения высоты береговых дамб и сезонных изменений УГВ.

При анализе усилий принимались во внимание различные условия работы тоннеля. Например, для его участка под северным берегом для этапа строительства учитывалась комбинация нагрузок, вызванных только текущими глубиной

заложения тоннеля и УГВ, тогда как для этапа эксплуатации нагрузки, вызванные текущими глубиной расположения тоннеля и УГВ, объединялись с добавочной нагрузкой, вызванной наращиванием береговой дамбы.

Для расчета внутренних усилий в обделке тоннеля использовался модифицированный рутинный метод, а для прогнозирования деформаций принимался во внимание «арочный» эффект (результат перераспределения и уравновешивания нагрузок от грунта. – Ред.).

Обделка участка тоннеля под северным берегом показала самые неблагоприятные характеристики усилий на этапе эксплуатации. Результаты расчетов (рис. 10) показали, что деформирование обделки на этапе эксплуатации после выполнения работ по наращиванию береговой дамбы будет соответствовать контрольному требованию не более чем на  $3\%D$ , где  $D$  – наружный диаметр тоннеля.

На основе полученных результатов анализа усилий был выполнен проект армирования обделки тоннеля на данном участке.

### ВЫБОР ФИБРОБЕТОНА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ►

Как показали исследования [16, 17], стальфибробетон (бетон, армированный стальными волокнами) имеет более хорошие упругие свойства в отношении трещиностойкости, сейсмостойкости и усталостной прочности, чем обычный бетон.

Характеристики материалов, выбранных для заводского изготовления, помогли определить эффективность, безопасность и надежность разных видов обделки рассматриваемого тоннеля. Чтобы преодолеть проблемы, связанные с большими переменными нагрузками, для участков, где в долгосрочной перспективе потребуются улучшенные механические характеристики и повышенная трещиностойкость, запроектировали стальфибробетонную обделку.

### УЛУЧШЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОБЩЕЙ ЖЕСТКОСТИ ►

Для повышения общей жесткости и контроля деформаций тоннеля при больших переменных нагрузках запланировали усиленные соединения между элементами обделки. Во-первых, между сегментными кольцами запроектирова-

ли по 34 штыря. Во-вторых, количество соединительных болтов между кольцами увеличили в два раза – с 34 до 68. Распределение штырей и соединительных болтов показано на рисунке 11. Наконец, в сегментные кольца, для которых в долгосрочной перспективе ожидались дополнительные большие нагрузки, запланировали встроить стальные закладные пластины, а затем приварить к ним другие стальные пластины для повышения деформационной стойкости соединений сегментов (рис. 12).

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ►

Проект тоннеля под рекой Хуанхэ в городе Цзинань на автодороге Цзинань – Хуанган столкнулся с такими проблемами, как большие переменные нагрузки на этапе эксплуатации в результате глубокой эрозии дна реки и отложения на нем наносов, масштабного повышения береговых дамб и сезонных изменений УГВ. В представленной работе были

проанализированы воздействия больших переменных нагрузок на обделку данного тоннеля и рассмотрены предложенные ключевые технологии для повышения устойчивости сооружения. На основе результатов проведенного анализа были сделаны следующие выводы и даны следующие рекомендации.

1. Большие переменные нагрузки могут вызывать резкие изменения в условиях среды, окружающей тоннели, пройденные щитовым способом, что потенциально может приводить к постоянным нарушениям в облицовке этих сооружений и представлять угрозу для их безопасности.

2. Для повышения устойчивости тоннеля под рекой Хуанхэ при анализе усилий в его конструкциях важно учитывать сложные эксплуатационные условия. Эффективным подходом может быть применение обделки из стальфибробетона и усиление соединений элементов обделки.

3. Рассмотренные ключевые технологии для повышения устойчивости могут применяться и для других тоннелей, строящихся щитовым способом, если они подвергаются и/или будут подвергаться воздействиям других типов больших переменных нагрузок. **и**

*Автор выражает благодарность таким специалистам, как Чжусинь Вэнь, Гуанмин Ю, Чжусинь Цзян и Нянь Лю, работающим в компании «Шанхайский муниципальный инженерно-проектный институт», за их руководство и сотрудничество при проведении исследований по тоннелю под рекой Хуанхэ в городе Цзинань на дороге Цзинань – Хуанган на этапе проектирования, а также хотел бы выразить признательность за финансовую поддержку со стороны проекта Dawn/«Рассвет» (№ K2022K127) компании «Шанхайский муниципальный инженерно-проектный институт».*

## ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

### (SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Chen J. Key technologies for improving resilience of super-large diameter shield tunnel affected by large variable loads underneath the Yellow River // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. Vol. 1333. Proceedings of the Geo Shanghai International Conference 26.05.2024 – 29.05.2024, Shanghai, China. 2024. Vol. 4: Tunnelling and Underground Construction. Paper 012012. DOI:10.1088/1755-1315/1333/1/012012.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРОМ ПЕРЕВЕДЕНОЙ СТАТЬИ ►

### (REFERENCES USED BY THE AUTHOR OF THE TRANSLATED PAPER) ►

1. Huang R. 2008. Unde. Engi. Tunn. 2–8, 60.
2. Huang R. 2008. Unde. Engi. Tunn. 1–7.
3. Wang M., Sun M., Tan Z. 2009. Engi. Scie. 11. 11–17.
4. Guo X., Min F., Zhong X., Zhu W. 2012. Chin. J. Rock Mech. Engi. 31. 2154–2160.
5. Xing H. 2010. Mode. Tunn. Tech. 47. 68–73.
6. Zhang Y., Wen Z., You G., Liu N. 2019. Tunn. Cons. 39. 669–676.
7. Wen Z. 2022. Mode. Tunn. Tech. 59. 928–933.
8. Hong K., Feng H. 2021. Tunn. Cons. 41. 1259–1280.
9. You G., Wen Z., Liu N., Hou J. 2021. Chin. J. Unde. Spac. Engi. 17. 221–227.
10. Shao H., Huang H., Zhang D., Wang R. 2016. Chin. J. Geot. Engi. 38. 1036–1043.
11. He C., Su Z., Zeng D. 2007. Chin. J. Rock Mech. Engi. 26. 2063–2069.
12. Li Q., Zhang D., Fang Q., Li D. 2014. Chin. J. Rock Mech. Engi. 33. 3911–3918.
13. Liu T. 2008. Chin. J. Rock Mech. Engi. 27. 3393–400.
14. Dai H., Chen R., Chen Y. 2006. Chin. J. Geot. Engi. 28. 312–316.
15. Chen X., Yu Y., Bao X., Cui H., Xia C. 2022. Mode. Tunn. Tech. 59. 14–28.
16. Gong C., Ding W. 2017. Chin. J. High. Tran. 30. 134–142.
17. Zheng A., Xu B., Chen X. 2020. Mode. Tunn. Tech. 57. 52–58, 73.