

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЕЙ

Е.Ю. Куликова

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: fragrante@mail.ru

Аннотация: Выявлены основные причины отказов коммунальных подземных сооружений. Показано, что при появлении дефектов в обделке подземного сооружения наибольшую опасность представляет ржавление арматуры бетонной конструкции, которая при соприкосновении с влагой тоннельной атмосферы увеличивается в размере в несколько раз, что приводит к разрыву тела бетона и «отказу» всей конструкции. Источником агрессивного воздействия на конструкции тоннелей могут служить: грунтовый массив, грунтовые воды, тоннельная среда. Железобетон, являющийся основным материалом обделки подземных сооружений города, — комплексный материал, в конструкциях из которого стальная арматура воспринимает обычно растягивающие напряжения, а бетон — сжимающие. В агрессивных условиях конструкция может быть долговечной, если бетон достаточно стойкий и длительно сохраняет способность защищать арматуру. Появление и развитие коррозии арматуры свидетельствует о потере бетоном защитной способности под влиянием внешних факторов, к которым относятся физические, физико-химические и химические процессы. Описан наиболее действенной способ совершенствования материалов обделки подземных сооружений — введение добавок, повышающих водонепроницаемость бетона, его коррозионную стойкость, снижающих размываемость бетонных смесей. Впервые приведена методика испытания бетонов с добавкой серноокислого алюминия на коррозию арматуры.

Ключевые слова: подземное сооружение, железобетон, арматура, добавка серно-кислого алюминия, суперпластификатор, коррозия.

Для цитирования: Куликова Е. Ю. Совершенствование антикоррозионной защиты обделки тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 3. — С. 30–35. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-30-35.

Improvement of corrosion protection of tunnel lining

E.Yu. Kulikova

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: fragrante@mail.ru

Abstract: Increasing rates of urbanization in Russia and around the world require new approaches to ensure trouble-free operation of municipal tunnels, which are the basis of life support of the city. The modern era is characterized by complication of tunneling and tunnel operation conditions, which often leads to defects in reinforced concrete lining of tunnels, reducing their service life and requiring enormous costs for repair. Furthermore, the implemented repair often fails to guarantee long-term trouble-free operation of the tunnels later on. The paper identifies the main causes of failure of underground utilities. It is shown that when defects appear in lining of underground structures, the greatest hazard is rusting of concrete reinforcement, which, when exposed to moisture in the tunnel air, increases in size several times, which leads to the rupture of concrete and to failure of the whole structure.

© Е.Ю. Куликова. 2019.

The sources of aggressive action on tunnel structure are: soil and rock mass, groundwater; tunnel environment. Destroying the tunnel structure, the aggressive medium promotes flow of various harmful substances into the environment. Reinforced concrete, which is the main material for lining of underground structures of a city, is a compound material composed of steel resisting tension and concrete resisting compression. In aggressive conditions, the lining structure can be durable if concrete is sufficiently resistant and retains the ability to protect reinforcement steel for a long time. The appearance and growth of corrosion of reinforcement indicates protective ability loss of concrete under the influence of external factors, which include physical, physico-chemical and chemical processes. The only reliable solution to this problem is to improve these load-bearing materials. This article describes the most effective way of improving materials for lining of underground structures — introduction of additives that increase water permeability and corrosion resistance of concrete and reduces its erosion. For the first time, the procedure of corrosion test of steel reinforcement in concrete with addition of aluminum sulfate is presented. The introduction of such an additive, which is quite cheap and not scarce, can significantly increase the durability of tunnels. In this case, the mobility of the concrete mixture is increased by about 125%, the setting time is slightly reduced, the concrete ceases to let water at a pressure of about 1.2 MPa, and the strength of concrete increases to 150% compared to concrete without additives.

Key words: underground structure, reinforced concrete, steel reinforcement, aluminum sulfate additive, superplasticizer, corrosion.

For citation: Kulikova E. Yu. Improvement of corrosion protection of tunnel lining. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;3:30-35. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-30-35.

Введение

Стремительный рост народонаселения Земли (в 1900 г. — около 1,7 млрд, к концу 2018 г. — 7,4 млрд чел.) привел к бурному росту в мире крупных городов [1, 2]. К 2018 г. число городов с населением 1 млн и более человек достигло 520, тогда как в начале XX в. их насчитывалось около 20.

Урбанизация в России также достигла впечатляющих масштабов. Доля городского населения в России в настоящее время — 80,9%, количество городов-миллионеров — 16, 170 городов имеют население более 100 тыс. чел., 22 города — население от 500 до 1 млн жителей. Такие города, как Москва и Санкт-Петербург являются мультимиллионерами: в Москве в настоящее время насчитывается 12 млн 300 тыс. чел. (9 место в мире), в Санкт-Петербурге 5 млн 200 тыс. жителей.

В сложившихся условиях возникла необходимость оснащения городов современными инженерными системами жизнеобеспечения, которая в известной

степени решается за счет подземного строительства.

Ежегодно в Российской Федерации строится около 200–250 км подземных сооружений тоннельного типа, из них значительная часть приходится на коммунальные тоннели. Только в Москве в год сооружается порядка 700–800 км коллекторов диаметром от 0,5 до 2,0 м, причем на тоннели с диаметром 0,5–0,8 м приходится 45%, от 1,0 до 1,5 м — 23%, 2,0 м — 20%, свыше 2,0 м — около 20%. Для большинства коммунальных тоннелей материалом обделки является железобетон. Поэтому интерес представляет вопросы долговечности последнего.

Теория вопроса

«Отказы» в процессе эксплуатации этих подземных сооружений приводят к тяжелым последствиям для жителей городов: провалам дорожного полотна, зачастую с заполнением образовавшейся ямы кипятком, гибелью людей, попавших в эти провалы, мощным фонтаниро-

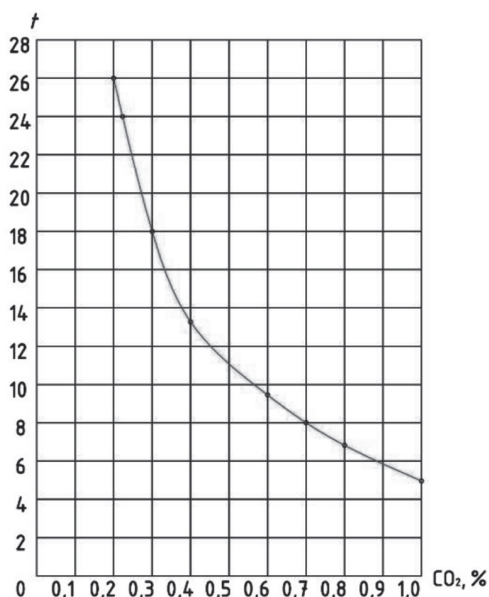
ванием вод из-под земли, затоплением улиц и т.п.

Существует мнение, что от 40 до 70% коммуникаций в различных городах подлежат замене или капитальному ремонту.

Статистика показывает, что несмотря на совершенствование техники и технологии ремонта, выход из строя отдельных участков коммуникаций опережает темпы их замены и ремонта, приводя к развитию «отказов» и, соответственно, к увеличению финансовых и материальных расходов на их ликвидацию.

Рядом ученых [3–5] проведены визуальные и инструментальные обследования тоннелей городских подземных коммуникаций, которые позволили установить наиболее существенные причины «отказов» обделок таких тоннелей, а именно:

- нейтрализация защитного слоя бетона в армированных конструкциях в результате воздействия углекислого газа, хлоридов, сероводорода;



Зависимость времени нейтрализации защитного слоя бетона обделки от содержания CO₂ в атмосфере коллектора

Dependence of the time of protective layer of concrete lining neutralization from CO₂ content in the atmosphere of the collector

- ржавление стержней арматуры;
- водопроницаемость обделки тоннелей.

Результаты обследования

Считается [3, 4], что в обычных условиях внутритоннельная атмосфера содержит то же количество углекислоты, что и земная (0,03%). В то же время в ряде случаев имеет место многократное превышение этого количества (0,5–0,7%). Особенно это касается канализационных тоннелей.

В результате происходит быстрая нейтрализация и разрушение защитного слоя бетона, коррозия арматуры, ведущая к «коржению», растрескиванию бетона и порче обделки тоннеля.

На рисунке приводится полученная по данным обследования зависимость времени нейтрализации защитного слоя бетона обделки тоннеля от содержания CO₂ в его атмосфере.

Последние данные по обследованию, проведенные ООО «Спец-СтройЭксперт» участка тоннеля от шоссе Энтузиастов до Измайловского шоссе и тоннеля в районе станции метро «Автозаводская» выявили, что толщина защитного слоя ребристых плит не превышает 148 мм, плоских плит 13,8 мм, железобетонных балок 15,8 мм при глубине карбонизации, соответственно, 0,81 мм/год, 0,74 и 0,7 мм/год. Следовательно, полная карбонизация защитного слоя наступит через 18 лет. На 15–16 году эксплуатации тоннеля обнажение и ржавление арматуры обнаружено на 50% от общей длины коллектора, что и потребовало капитального ремонта обделки.

Обработка данных по другим тоннелям показала, что чаще всего содержание CO₂ в их атмосфере находится в пределах 0,5–0,7%. Это полностью корреспондирует данным рисунка, т.к. соответствует положению [3] о том, что время безаварийной работы коммуника-

ционного тоннеля находится в пределах 20–22 лет.

Практическая ликвидация защитного слоя приводит к умеренному ржавлению арматуры со скоростью 0,07–0,11 мм/год, по данным разных исследователей [3, 4] и обвалам в тоннелях. Са(ОН)₂ бетона пассивирует поверхность арматурного стержня, исключая его возможное разрушение при неблагоприятных условиях. Гидроксид кальция легко вымывается водой или при фильтрации через обделку нейтрализуется углекислым газом. С целью удержания этого соединения рекомендуется ряд мероприятий, таких как катодная и электрохимическая защита арматуры, использование дополнительных элементов в конструкции обделки, предварительная обработка арматуры ингибиторами коррозии, оптимизация технологии возведения обделки, совершенствование ее материала и т.п. Все эти меры приводят к значительному удорожанию подземного объекта, включая период его эксплуатации.

Изменение состояния железобетонной конструкции с добавкой сернокислого алюминия во времени

Changes in the state of reinforced concrete structure with the addition of aluminum sulfate in time

№ п/п	Состав бетона	% добавки от веса цемента	Состояние стержня арматуры после			
			20 дней твердения	60 дней твердения	90 дней твердения	7 лет твердения
1	1:2,6:3,4	0,0	чуть заметные точки ржавчины	пятна ржавчины размером 0,1 см	пятна ржавчины	полностью заржавел
2		0,5	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень	пятна ржавчины
3		0,8	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень
4		1,0	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень
5		1,2	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень
6		1,5	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень
7		2,0	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень	чистый стержень
8		2,5	точки ржавчины на образующей	чистый стержень	точки ржавчины	пятна ржавчины
9		3,0	большое пятно ржавчины (1 см ²) на торце и образующей стержня	небольшое пятно ржавчины на образующей (0,1 см ²)	пятна ржавчины	пятна ржавчины

Методика исследования

Наиболее перспективным и экономически выгодным является совершенствование материала обделки, например, за счет введения в бетонную смесь химических добавок, особенно добавок-электролитов. Однако, часто добавка электролитов в бетон наряду с улучшением ряда качеств материала приводит к усилению коррозии арматуры и закладных частей. Это сильно ограничивает применение таких добавок в сложных гидрогеологических условиях. Однако применение добавок сернокислого алюминия исключает эти негативные последствия.

Испытание бетонов с добавкой сернокислого алюминия на коррозию арматуры проводилось по нижеследующей методике [6].

Шлифованный стержень арматуры длиной 100 мм и диаметром 14 мм закладывался при изготовлении в образец бетона размером 100×100×200 мм. Через 5 дней после изготовления нижний конец образца помещался в ванну с водой.

Полученные результаты

Доказано, что в случае нахождения бетона с арматурой в воздушно-сухих условиях с влажностью воздуха до 90%, коррозия арматуры достигает наивысшей степени за счет капиллярного подсоса.

В таблице [6] приводятся данные о коррозии арматуры в бетонах с добавкой серноокислого алюминия. Бетон на портландцементе Подольского завода и стандартных заполнителях.

Как следует из данных таблицы оптимальная добавка серноокислого алюминия практически не вызвала коррозии арматуры даже в сложных условиях в течение 7 лет. Этот результат не является неожиданным. По данным Института физической химии и электрохимии РАН, гидроксид алюминия в теле бетона способствует резкому торможению процессов коррозии арматуры. Гидроксид алюминия образуется при введении добавки серноокислого алюминия в бетон, при этом он пассивирует сталь.

Известно, что добавки серноокислого алюминия резко повышают водонепроницаемость бетона, его коррозионную стойкость, снижают размываемость бетонных смесей и пр. Поэтому введение такой добавки, которая достаточно дешевая и не дефицитная, позволяет значительно увеличить долговечность тоннелей.

С технологической точки зрения можно рекомендовать эту добавку в сочетании с суперпластификатором С-3, который создан на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонден-

сатов методом органического синтеза целлюлозных соединений и представляет собой поверхностно-активное вещество, влияющее на процесс формирования структуры смеси, снижая ее потребность в воде и повышая прочность. Это сочетание представляет 1% С-3 и 1% $Al_2(SO_4)_3$, (1% берется от веса цемента).

В этом случае подвижность бетонной смеси повышается примерно на 125%, сроки схватывания незначительно уменьшаются, бетон перестает пропускать воду при давлении порядка 1,2 МПа, прочность бетона повышается до 150% по сравнению с бетоном без добавки.

Выводы

1. Рост больших городов требует значительного расширения строительства коммунальных систем его жизнеобеспечения в подземном пространстве. Усложнение инженерно-геологических и гидрогеологических условий заложения таких объектов, условий их эксплуатации, несвоевременные ремонты приводят к развитию «отказов», обусловленных, главным образом, нейтрализацией защитного слоя бетона несущих конструкций тоннелей.

2. Снижение риска «отказов» несущих конструкций коммунальных тоннелей возможно за счет совершенствования физико-механических свойств материалов обделки. Проведенные исследования позволили установить, что наиболее оптимальным решением данной задачи является введение в состав бетона серноокислого алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перцик Е. Н. Города мира. География мировой урбанизации. — М.: Международные отношения, 1999. — 384 с.
2. Нефедова Т. Г., Трейвиш А. И. Теория «дифференциальной урбанизации» и иерархия городов в России на рубеже XXI века // Проблемы урбанизации на рубеже веков / Отв. ред. А. Г. Махрова. — Смоленск: Изд-во «Ойкумена», 2002. — С. 71–86.
3. Кириленко А. М. Диагностика железобетонных конструкций и сооружений. — М.: Архитектура, 2013. — 365 с.
4. Причины разрушения тоннелей в процессе их эксплуатации [электронный ресурс]. — режим доступа: <http://fecland.ru/tonneli/198>.
5. Шилин А. А. Ремонт железобетонных конструкций. — М.: Изд-во «Горная книга», 2010. — 519 с.

6. Куликов Ю. Н. Патент РФ № 176196 (933893/29-14). Бетон для подземного и гидротехнического строительства. 1965. Бюл. № 21.
7. Коллекторы и тоннели канализационные. Требования к проектированию, строительству, контролю качества и приемки работ. СТО НОСТРОЙ. 2.17. 66-2012. — М.: БСТ, 2013. — 101 с.
8. Куликова Е. Ю. Фильтрационная надежность конструкций городских подземных сооружений. — М.: Изд-во «Мир горной книги», 2007. — 316 с.
9. Русанов В. Е. К оценке эффективности применения фибробетона в сборных тоннельных обделках // Транспортное строительство. — 2010. — № 3. — С. 13—16.
10. Vasil'ev V., Lapšev N., Stolbichin Ju. Microbiological corrosion of underground sewage facilities of Saint Petersburg // World Applied Sciences Journal 23 (Problems of Architecture and Construction): 2013. Pp. 184—190.
11. Ghafar Nima Corrosion control in underground concrete structures using double waterproofing shield system // Construction and building materials. 2012. № 36.
12. Wenqi Ding, Chenjie Gong, Khalid M. Mosalam, Kenichi Soga Development and application of the integrated sealant test apparatus for sealing gaskets in tunnel segmental joints // Tunnelling and Underground Space Technology. 2017. Vol. 63. Pp. 54—68. **WJAS**

REFERENCES

1. Pertsik E. N. *Goroda mira. Geografiya mirovoy urbanizatsii* [Cities of the world. Geography of world urbanization], Moscow, Mezhdunarodnye otnosheniya, 1999, 384 p.
2. Nefedova T. G., Treyvish A. I. Teoriya «differentsial'noy urbanizatsii» i ierarkhiya gorodov v Rossii na rubezhe XXI veka [Theory of «differential urbanization» and hierarchy of cities in Russia at the turn of the XXI century]. *Problemy urbanizatsii na rubezhe vekov*. Makhrova A. G. (Ed.). Smolensk, Izd-vo «Oykumena», 2002, pp. 71—86.
3. Kirilenko A. M. *Diagnostika zhelezobetonnykh konstruksiy i sooruzheniy* [Diagnosis of reinforced concrete structures and buildings], Moscow, Arkhitektura, 2013, 365 p.
4. *Prichiny razrusheniya tonneley v protsesse ikh ekspluatatsii* [Causes of destruction of tunnels during their operation], available at: <http://fecland.ru/tonneli/198>.
5. Shilin A. A. *Remont zhelezobetonnykh konstruksiy* [Repair of reinforced concrete structures], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2010, 519 p.
6. Kulikov Yu. N. Патент RU 176196 (933893/29-14), 1965.
7. *Kollektory i tonneli kanalizatsionnye. Trebovaniya k proektirovaniyu, stroitel'stvu, kontrolyu kachestva i priemki rabot*. СТО НОСТРОЙ. 2.17. 66-2012 [Sewers and sewer tunnels. Designing, construction, quality supervision and acceptance of works. System of standardization of the National Association of Builders 2.17. 66-2012], Moscow, BST, 2013, 101 p.
8. Kulikova E. Yu. *Fil'tratsionnaya nadezhnost' konstruksiy gorodskikh podzemnykh sooruzheniy* [Filtration reliability of structures of urban underground structures], Moscow, Izd-vo «Mir gornoy knigi», 2007, 316 p.
9. Rusanov V. E. To the topic of assess of the effectiveness of the use of fiber concrete in pre-cast tunnel lining. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2010, no 3, pp. 13—16. [In Russ].
10. Vasil'ev V., Lapšev N., Stolbichin Ju. Microbiological corrosion of underground sewage facilities of Saint Petersburg. *World Applied Sciences Journal* 23 (Problems of Architecture and Construction): 2013. Pp. 184—190.
11. Ghafar Nima Corrosion control in underground concrete structures using double waterproofing shield system. *Construction and building materials*. 2012, no 36.
12. Wenqi Ding, Chenjie Gong, Khalid M. Mosalam, Kenichi Soga Development and application of the integrated sealant test apparatus for sealing gaskets in tunnel segmental joints. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017. Vol. 63. Pp. 54—68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Куликова Елена Юрьевна — доктор технических наук, профессор, e-mail: fragrante@mail.ru, НИТУ «МИСиС».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

E. Yu. Kulickova, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: fragrante@mail.ru, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.