УДК 624.131.1

П.В.КОТЮКОВ, *аспирант, pavel_spmi@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

P.V.KOTYUKOV, *post-graduate student, pavel_spmi@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ПОДЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Рассмотрены особенности разрушения конструкционных материалов подземных транспортных сооружений в зависимости от специфики инженерно-геологической, гидрогеологической и геоэкологической обстановки подземного пространства Санкт-Петербурга. Проанализированы основные варианты размещения перегонных тоннелей и характер протекающих процессов деградации конструкционных материалов обделок в условиях интенсивного влияния гидродинамики и гидрохимии водоносных горизонтов, природного и природно-техногенного газообразования, а также микробной активности в подземном пространстве. Приведены результаты химических анализов разрушенных конструкционных материалов и новообразований. Исследован видовой и родовой состав микроорганизмов, участвующих в коррозионных процессах конструкционных материалов.

***Ключевые слова*:** подземные транспортные сооружения, инженерно-геологические и гидрогеологические условия, верхнекотлинские глины венда, погребенные долины, нижнекотлинский водоносный горизонт, коррозия конструкционных материалов, геоэкологическая обстановка, микулинские отложения, биокоррозия.

THE ESTIMATION FEATURES OF VULNERABILITY AND DESINTEGRATION OF SUBWAY CONSTRUCTION MATERIALS IN SAINT PETERSBURG

In this paper the features of subway construction materials degradation depending on engineering-geological, hydro-geological and geoecological conditions of Saint Petersburg underground space are considered. The basic types of subway construction placing and their destruction specificity depending on influence of water-bearing horizons hydrodynamic and hydro chemical conditions, natural and natural-technogenic gas bio-production and microbial activity are analyzed. The examples of the disintegrated materials and new growths (salt efflorescence, stalactites and others) chemical compound features depending on the content of ground waters basic components affecting on tunnels lining are resulted.

***Key words*:** subway constructions, engineering-geological and hydrogeological conditions, upper Vendian clays, paleo bottom-lands, lower-kotlinskij aquifer, construction materials corrosion, geoecological conditions, mikulinskie deposits, biocorrosion.

Рассматривается действие коррозионной способности многокомпонентной подземной среды по отношению к несущим обделкам и гидроизоляционному слою перегонных тоннелей Петербургского метрополитена, которые относятся к уникальным инженерным сооружениям. Схематизация тоннелей в зависимости от глубины их размещения и специфики инженерно-геологических, гидрогеологических и геоэкологических ус-

ловий разреза подземного пространства города позволяет рассмотреть особенности процессов разрушения конструкционных материалов подземных сооружений.

Бóльшая часть перегонных тоннелей Петербургского метрополитена пройдена в верхнекотлинской глинистой толще верхнего венда, положение кровли которой зависит от наличия в разрезе погребенных долин. Глубина вреза палеодолин в коренные породы варьирует в широких пределах – от 15-20 до 80 м. На таких участках перегонные тоннели обычно проходят ниже подземного контура погребенной долины в непосредственной близости от напорного нижнекотлинского горизонта, химический состав вод которого характеризуется высоким содержанием хлоридов – от 2,0 до 2,9 г/дм^3, ионов калия и натрия – от 1,2 до 1,7 г/дм^3 и общей минерализацией 3,5-5,0 г/дм^3. Палеодолины приурочены к зонам линейных тектонических разломов, где отмечается наибольшая степень дезинтегрированности коренных глинистых отложений венда.

Оценка влияния нижнекотлинского водоносного горизонта на условия эксплуатации перегонных тоннелей производится с двух позиций: 1) действие напоров горизонта на формирование напряженно-деформированного состояния толщи пород и тоннелей; 2) степень агрессивности вод по отношению к материалам конструкций.

Гидродинамический режим нижнекотлинского водоносного горизонта зависит, прежде всего, от уровня водопотребления в городе, который в прошлом веке варьировал в значительном объеме. С конца 70-х годов прошлого века при снижении водопотребления отмечался интенсивный подъем уровня пьезометрической поверхности горизонта, который к 2008 г. достиг 95 м над кровлей горизонта и продолжает повышаться. В настоящее время наблюдается просачивание подземных вод в перегонные тоннели в условиях разрушения их гидроизоляции и обделки.

Разгрузка минерализованных вод из напорного нижнекотлинского горизонта по стыкам и через тело обделки происходит в результате разрушения гидрорубашки затюбингового пространства, что ускоряет деградацию железобетонных и чугунных обделок. В местах стыков отдельных блоков и на их поверхности образуются натечные формы в виде сталактитов, наростов и высолов, увеличивается проницаемость конструкции и снижается ее прочность.

Фильтрация напорных минерализованных вод через тело обделки вызывает растворение и вынос гидроксида кальция и магния из порового пространства цементов бетонной конструкции, позднее разрушаются цементные минералы (ЦМ) – гидросиликаты и гидроалюминаты кальция. Анализ химического состава водных вытяжек, приготовленных из новообразований и разрушенных конструкционных материалов, показал, что почти во всех пробах отмечается высокое содержание хлоридов – до 112,0 г/дм^3, натрия и калия – до 85,6 г/дм^3 (табл.1).

Зафиксированы повышенные содержания кремниевой кислоты (до 0,3 г/дм^3), алюминия (до $37{,}9\cdot10^{-3}$ г/дм^3) и сульфатов (до 34,5 г/дм^3). Значительные концентрации сульфатов связаны с выносом компонентов гипса (компонент расширяющегося цемента «гидрорубашки»), а также с деятельностью тионовых бактерий. На активную жизнедеятельность микроорганизмов указывают аномально высокие значения химического потребления кислорода (до 17960 мг O_2/дм^3) и $БПК_5$ (до 9114 мг O_2/дм^3) в водных вытяжках.

Исследования, проведенные совместно с Биологическим институтом Санкт-Петербургского государственного университета, показали, что видовой и родовой состав микроорганизмов-деструкторов довольно разнообразен. В деградированных материалах некоторых перегонных тоннелей под погребенными долинами обнаружено более 60 видов микромицетов численностью до 1400 колониеобразующих единиц (КОЕ). Зафиксирована четкая взаимосвязь между количеством течей и значением КОЕ.

Наиболее сложные условия эксплуатации наблюдаются на участках перегонных тоннелей, пройденных вне погребенных долин в контактной зоне водонасыщенных четвертичных песчано-глинистых грунтов с

Таблица 1

Результаты исследований химического состава водных вытяжек из различных конструкционных материалов и новообразований в транспортных тоннелях, расположенных под палеодолинами в непосредственной близости от напорного нижнекотлинского водоносного горизонта

Показатель и его единица	Сталактиты с ребер жесткости обделки	Сталактиты бурого цвета	Высолы белого цвета на обделке	Разрушенный чугун
pH, ед. pH	9,4	9,2	7,8	9,8
Перманганатная окисляемость, мг O_2/дм^3	541,9	6258,0	614,8	11270,0
ХПК, мг O_2/дм^3	817,2	12143,0	1248,9	17960,0
$БПК_5$, мг O_2/дм^3	111,3	95,6	315,5	9114,0
Жесткость, ммоль/дм^3	37,0	15,0	21,0	1,8
Азот аммонийный, мг/дм^3	17,2	33,2	9,4	5,1
Хлориды, мг/дм^3	90043,0	67355,0	112022,0	1207,6
Гидрокарбонаты, мг/дм^3	85,2	9972,0	61,3	2004,5
Сульфаты, мг/дм^3	34542,0	2727,0	5272,0	3127,0
Карбонаты, мг/дм^3	18,7	1345,0	<1,0	891,9
Нитраты, мг/дм^3	1,5	<0,5	3,6	1,9
Кремниевая кислота, мг/дм^3	15,3	304,3	37,2	37,8
Гидраты (гидроксиды), мг/дм^3	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Натрий + калий, мг/дм^3	85621,0	69828,0	76170,0	3356,0
Кальций, мг/дм^3	558,2	227,4	318,5	27,1
Магний, мг/дм^3	108,5	45,6	65,2	5,6
Алюминий, мг/дм^3	14,6	0,92	4,8	0,01
Железо общее, мг/дм^3	0,27	0,65	0,39	1,0
Сухой остаток, мг/дм^3	210986,0	173056,0	193933,0	9998,0

Примечание. ХПК и БПК – соответственно химическое и биологическое потребление кислорода.

Таблица 2

Результаты исследований химического состава водных вытяжек из различных конструкционных материалов и новообразований в транспортных тоннелях, расположенных вне зоны погребенных тоннелей в контактной зоне четвертичных и коренных отложений

Показатель и его единица	Сталактиты	Выщелоченный тампонажный раствор 1	Выщелоченный тампонажный раствор 2	Вынос материала по стыкам со слизью
pH, ед. pH	10,0	9,8	10,1	7,5
Перманганатная окисляемость, мг O_2/дм^3	92,1	168,3	603,9	118,8
ХПК, мг O_2/дм^3	164,9	455,9	6984,0	213,4
$БПК_5$, мг O_2/дм^3	51,9	97,0	326,6	75,7
Жесткость, ммоль/дм^3	0,2	2,5	44,5	40,2
Азот аммонийный, мг/дм^3	5,8	6,2	8,3	7,2
Хлориды, мг/дм^3	212,7	496,2	2056,1	779,9
Гидрокарбонаты, мг/дм^3	613,0	1839,0	6743,0	1195,4
Сульфаты, мг/дм^3	109,1	1000,0	818,2	56,4
Карбонаты, мг/дм^3	2402,6	2420,0	56400,0	< 1,0
Нитраты, мг/дм^3	16,2	18,5	15,4	4,7
Кремниевая кислота, мг/дм^3	111,7	297,9	< 1,0	13,80
Гидраты (гидроксиды), мг/дм^3	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Натрий + калий, мг/дм^3	1388,5	2551,1	24805,0	48,1
Кальций, мг/дм^3	3,1	37,6	724,0	644,5
Магний, мг/дм^3	0,6	7,6	103,1	97,8
Железо общее, мг/дм^3	0,85	0,74	2,9	0,42
Сухой остаток, мг/дм^3	4864,5	8616,8	91678,0	2849,0

коренными породами. Расположение тоннелей в пределах участков неустойчивых деформируемых пород приводит к развитию больших амплитуд вертикальных перемещений тоннелей, что способствует образованию трещин растяжения в тоннельной конструкции с раскрытием от 2-3 до 5-10 мм и ускоряет процессы разрушения обделок.

Данные исследований показали, что солевой состав вытяжек в основном содовый (HCO_3^- до 6,7 г/дм^3), а не хлоридно-натриевый, как в тоннелях глубокого заложения, пройденных над нижнекотлинским горизонтом (табл.2). Как и в первом случае отмечается деградация бетонов с выносом основных компонентов (кальция, магния, алюминия и кремниевой кислоты), а также графитизация чугуна.

Большое воздействие на характер разрушения конструкционных материалов при неглубоком заложении перегонных тоннелей (20-25 м) оказывает геоэкологическая обстановка: наличие систем водоотведения, свалок хозяйственно-бытовых отходов, ликвидированных кладбищ и др.[3]. При этом усиливается развитие биокоррозионных процессов за счет поступления микроорганизмов с нисходящим потоком из таких источников.

Проведенные обследования показали, что в выработках на глубине 20,0 м, находящихся под ликвидированными кладбищами, в местах течей повсеместно фиксируется сероводород, содержание которого достигает 0,037 г/дм^3. В течах обнаружено наличие нематод. Отмечено образование слизей на поверхности обделки за счет деятельности железобактерий.

Существенно осложняет условия эксплуатации перегонных тоннелей присутствие в разрезе четвертичных межморенных микулинских слоев с богатой микрофлорой, способной разлагать битуминозную органику до простейших соединений – газов, в том числе растворимых – углекислый газ (продукт дыхания микроорганизмов) и малорастворимых – метана и азота [1]. При накоплении малорастворимых газов возникает опасность значительного изменения напряженно-деформированного состояния толщ грунтов. Локальные газодинамические давления на отдельных участках трассы приводят к неравномерным перемещениям тоннелей, формированию подъема конструкций и концентрации напряжений в несущей обделке, что способствует образованию дефектов и трещин в ней [1]. Разрушение обделки приводит к ускорению процессов ее дезинтеграции под действием минерализованных подземных вод и газов, переносящих микробиоту.

Агрессивность подземной среды настолько велика, что наблюдается даже разрушение битумов, которые в качестве эксперимента были использованы на одной из трасс как гидроизоляционный материал. Постепенное размягчение и растекание по банкету битумов было зафиксировано в пределах разреза тоннелей, пройденных ниже микулинских отложений, и рассматривается как следствие деградации битумов под воздействием привнесенной микробиоты из газогенерирующих слоев [2].

Агрессивность основных компонентов подземной среды, которая обычно не принимается во внимание при инженерно-геологических и геоэкологических исследованиях по трассам тоннелей, а также при проведении ремонтных работ, требует усовершенствования существующих и создания новых нормативов для разработки устойчивых конструкционных материалов, в том числе гидроизоляционных и специальных покрытий для тюбингов и других типов железобетонных обделок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дашко Р.Э.* Влияние газогенерации в четвертичных отложениях Санкт-Петербурга на условия эксплуатации перегонных тоннелей метрополитена / Р.Э.Дашко, П.В.Котюков, Е.Ю.Шатская // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС. 2008. Вып.10. С.208-213.

2. *Дашко Р.Э.* Геоэкологические факторы формирования инженерно-геологических и геотехнических условий в подземном пространстве Санкт-Петербурга. / Р.Э.Дашко, Е.Н.Ковалева // Развитие городов и геотехническое строительство / НПО «Георекнструкция – Фундаментпроект». СПб, 2008. Т.4. С.491-496.

3. *Дашко Р.Э.* Эволюция геоэкологического состояния подземного пространства Санкт-Петербурга / Р.Э.Дашко, Л.П.Норова, Е.С.Руденко // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8. С.57-59.

REFERENCES

1. *Dashko R.E., Kotyukov P.V., Shatskaya E.Ju.* The influence of gas generation in quaternary deposits of Saint-Petersburg on service conditions of metro tunnels // Proceedings of annual session of RAS (Russian academy of science) scientific council owing to problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology. Moscow: GEOS, 2008. Issue 10. P.208-213.

2. *Dashko R.E., Kovaleva E.N.* Geoecological factors of engineering geological and geotechnical conditions formation in underground space of Saint-Petersburg // Development of Urban Areas and Geotechnical Engineering / NPO «Georeconstruction-Fundamentproject». Saint Petersburg, 2008. V.4. P.491-496.

3. *Dashko R.E., Norova L.P., Rudenko E.S.* Evolution of geoecological conditions of Saint-Petersburg underground space // Exploration and conservation of mineral resources. 1998. № 7-8. P.57-59.

Научный руководитель д-р геол.-минерал. наук, профессор *Р.Э.Дашко*