УДК 624.131.1

Р.Э.ДАШКО, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, regda2002@mail.ru*
П.В.КОТЮКОВ, *ассистент, pavel_spmi@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

R.E.DASHKO, *Dr. in geol. & min. sc., professor, regda2002@mail.ru*
P.V.KOTYUKOV, *assistant lecturer, pavel_spmi@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Проанализировано влияние природных и техногенных факторов на эксплуатационную надежность функционирования перегонных тоннелей метрополитена, проложенных в верхнекотлинских глинах венда. Отмечено, что трещиноватость этих глин изучалась еще на стадии изысканий первых линий метро. Подчеркивается, что интенсивность трещиноватости глин усиливается в тальвеговых зонах погребенных долин, в пределах которых отмечается повышение количества течей в обделках тоннелей. Исследовано влияние гидродинамических и гидрохимических условий напорного вендского водоносного комплекса, залегающего ниже вмещающей толщи, на деформации и разрушение обделок. Экспериментально изучено снижение прочности глин при их взаимодействии с жидкими фазами. Приведен химический состав водных вытяжек из проб разрушенных конструкционных материалов и натечных форм. Показано значение биокоррозии в разрушении конструкционных и гидроизоляционных материалов, в том числе битумов. Предложены способы защиты тоннельных конструкций от биокоррозии.

Ключевые слова: эксплуатационная надежность, перегонные тоннели, инженерно-геологические и гидрогеологические условия, трещиноватость глин, погребенные долины, вендский водоносный комплекс, коррозия конструкционных материалов, газогенерирующие отложения, биокоррозия.

THE ENGINEERING GEOLOGICAL CONTROL OF UNDERGROUND TRANSPORT TUNNELS EXPLOITATION RELIABILITY IN SAINT PETERSBURG

The natural and technogenic factors effect on exploitation reliability of subway tunnels located in Upper Vendian clays are analyzed. It is noted what the fractured clays has been studied during the exploring of the first metropolitan lines. It is emphasized what the intensity of clay fracturing increases in thalweg zones of paleo-valleys within the bounds of which the quantity of underground water leakages in tunnels increases. The hydrodynamic and hydrochemistry conditions of Vendian high head horizon (lied under clays) influence on deformation and destruction of tunnels lining are investigated. The reduction of clays shear strength parameters under the interaction of clays and liquid phases is experimentally studied. The water extracts chemical composition of disintegrated construction materials and sinter forms are resulted. The important role of biocorroion in constructional and waterproof materials (included bitumen) disintegration is shown. The protection methods of tunnels constructions from biocorrosion are recommended.

Key words: exploitation reliability, subway tunnels, engineering geological and hydrogeological conditions, fractured clays, paleo-valley, vendian water-bearing strata, construction materials corrosion, gas generating deposits, biocorrosion.

Проведенные обследования перегонных тоннелей Петербургского метрополитена, анализ их вертикальных перемещений в зависимости от особенностей инженерно-геологической и гидрогеологической ситуации, специализированное изучение разрушенных конструкционных материалов и натечных форм (отобранных с поверхности обделок) позволили выделить основные природные и природно-техногенные факторы, которые негативно воздействуют на эксплуатационную надежность подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге, а также формируют реальную основу для геомеханических расчетов устойчивости тоннельных конструкций в конкретной инженерно-геологической обстановке (рис.1).

Большая 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 вендского водоносного комплекса (нижнекотлинского водоносного 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 от 3,5 до 5,0 г/дм^3 Палеодолины приурочены к зонам тектонических разломов, где отмечается наибольшая степень дезинтегрированности коренных глинистых отложений венда, представляющих собой трещиновато-блочную среду, в которой фильтрация по трещинам идет с гораздо более высокой скоростью, чем сквозь слабопроницаемые глинистые блоки [1]. Значение коэффициента фильтрации нарушенной тектонической и нетектонической трещиноватостью толщи глин в зонах палеоврезов достигает 10^{-1}-10^{-2} м/сут.

Следует отметить, что в современной практике проектирования перегонных тон-



Рис.1. Схема воздействия природных и техногенных факторов на эксплуатационную надежность работы системы тоннель – подземная среда



Примечание: над гистограммами указано абсолютное количество течей на 1 км трассы

Рис.2. Количество выявленных течей в несущих конструкциях тоннелей в зависимости от их расположения относительно элементов погребенных долин
2000-2006 гг. – данные ТОИС ГУП «Петербургский метрополитен»; 2007 г. – данные СПГГИ (ТУ)
1 – вне зон влияния погребенных долин; 2 – под склоновой частью палеодолины; 3 – под тальвегом погребенной долины

нелей не учитывается относительно высокая проницаемость верхнекотлинской глинистой толщи, которая до сих пор рассматривается как надежный водоупор. Вместе с тем, еще в 40-60-х годах прошлого века при проходке первых трасс Ленинградского метрополитена в верхнекотлинских глинах неоднократно были встречены крутопадающие почти вертикальные трещины, имеющие тектоническую природу [3]. Такие трещины в выработках формируют одну или несколько пересекающихся систем, унаследованных от разломов в породах кристаллического фундамента, который в пределах города залегает на глубинах 200-230 м. Главный геолог Ленметропроекта Р.Н.Кремнева отмечала, что основная часть трещин закрыта, однако встречаются и открытые трещины, по которым в выработки происходит просачивание подземных вод [3].

О проницаемости верхнекотлинских глин свидетельствуют многочисленные водопроявления (течи, капеж, увлажнение и др.), которые постоянно наблюдаются в эксплуатируемых перегонных тоннелях, размещенных в этих отложениях. Количество течей на участках тоннелей, пройденных под тальвегом и склоновой частью палеодолин в зонах тектоническим разломов, составляет в сумме 79-99 % от общего количества течей (рис.2).

Оценка влияния вендского водоносного комплекса на условия строительства и эксплуатации перегонных тоннелей должна производиться с нескольких позиций: 1) действие напоров комплекса на формирование напряженно-деформированного состояния толщи пород и тоннелей; 2) преобразование физико-механических свойств пород вмещающей толщи в результате их взаимодействия с минерализованными хлоридными натриевыми водами; 3) степень агрессивности вод по отношению к материалам конструкций.

Гидродинамический режим вендского водоносного комплекса зависит, прежде всего, от уровня потребления в городе вод данного комплекса, который в прошлом веке варьировал в значительном объеме. В пределах размещения трасс метрополитена снижение пьезометрического уровня вендского водоносного комплекса в 1976-78 гг. достигало 70 м. С 1978 г. было введено ограничение на использование вод этого комплекса, в связи с чем наметилась тенденция к подъему его пьезометрической поверхности, которая усилилась после 1990 г. в результате прекращения деятельности ряда промышленных предприятий. В настоящее время напоры вендского водоносного комплекса в пределах города составляют 95-100 м и продолжают подниматься со скоростью 1,5-2,0 м/год.

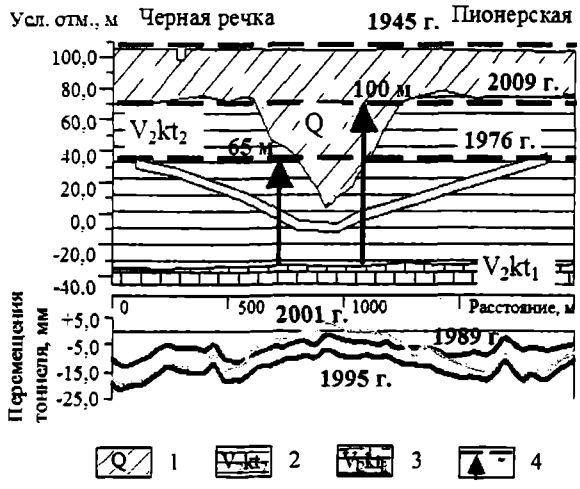


Рис.3. Схематический геолого-литологический разрез по трассе «Черная речка – Пионерская», совмещенный с графиками перемещений перегонных тоннелей

1 – толща четвертичных отложений; 2 – верхнекотлинские глины верхнего венда, в нижней части разреза переслаиваются с песчаниками; 3 – нижнекотлинские песчаники, содержащие минерализованные высоконапорные хлоридные натриевые воды вендского водоносного комплекса; 4 – положение пьезометрической поверхности вендского водоносного комплекса, цифра над стрелкой – величина напора, м

Варьирование положения пьезометрической поверхности водоносного комплекса формирует изменение напряженного состояния пород толщи и соответственно давление на тоннельную конструкцию. Эти воздействия прослеживаются по характеру перемещений тоннелей в различные годы наблюдений. В качестве примера можно привести трассу «Черная речка – Пионерская», которая расположена в пределах северной части города и в 70-е годы прошлого века оказалась в зоне развития глубокой депрессионной воронки водоносного комплекса (рис.3).

Как видно на рис.3, перегонные тоннели, пройденные вне контура погребенной долины в относительно слаботрещиноватых верхнекотлинских глинах, испытывают преимущественно перемещения оседания небольшой величины (до 24 мм) за счет неравномерного сжатия вмещающих пород. Под склонами палеодолины трасса погружается на значительную глубину и располагается ближе к кровле вендского водоносного комплекса, в результате чего усиливается взвешивающий эффект, оказываемый напорными водами этого комплекса на верхнекотлинские отложения и конструкции тоннелей. За счет давления от восходящего потока подземных вод наблюдается постепенный подъем тоннелей во времени при постоянном росте напоров. На участке перегонных тоннелей, пройденном под тальвегом палеовреза, подошва тоннелей находится на минимальном расстоянии (15 м) от кровли вендского водоносного комплекса, что определяет максимальное гидродинамическое давление подземных вод и приводит к подъему тоннельных конструкций выше первоначальной отметки их заложения (рис.3). Следует отметить, что в пределах этого участка возможна прямая гидравлическая связь между вендским водоносным комплексом и четвертичными водоносными горизонтами за счет высокой степени дезинтеграции коренных пород, а также присутствия в нижней части разреза верхнекотлинских глин прослоев водонасыщенных песчаников, в которых располагаются тоннели.

Рост градиентов напора способствует интенсификации восходящего перетекания вод вендского водоносного комплекса через трещиноватую толщу водоупора верхнекотлинских глин, особенно в пределах зон тектонических разломов. Заполнение трещин в глинистой толще минерализованными водами способствует протеканию диффузионно-осмотических процессов между фильтрующейся водой и пористыми блоками при отсутствии набухания глин. В результате обменных реакций происходит замещение ионов кальция и магния диффузионного слоя глин на ионы натрия, что способствует диспергированию породы и повышению степени ее гидрофильности. По результатам лабораторных исследований установлено, что действие хлоридно-натриевых растворов с минерализацией 3,8 г/дм^3 переводит верхнекотлинские глины в квазипластичное состояние ($\varphi = 0$, $c \neq 0$), при этом наблюдается снижение параметров прочности пород почти в два раза (см. таблицу). Следует отметить, что в массиве прочность трещиноватых глин с учетом коэффициента структурного ослабления может уменьшаться в 2-2,5 раза.

В ходе опытов отмечалось, что рост нормальных давлений способствует разви-

Изменение параметров физико-механических свойств образцов верхнекотлинских глин при их взаимодействии с хлоридными натриевыми растворами и дистиллированной водой

Образцы глин	Плотность скелета ρ_d, г/см^3	Влажность ω, %	Параметры сопротивления сдвигу	
			Сцепление c, МПа	Угол внутреннего трения φ, град
До взаимодействия с жидкими средами	1,95	12,5	0,70	12
После взаимодействия с хлоридными натриевыми растворами (без набухания)		14,2	0,36	0-2
После взаимодействия с дистиллированной водой (без набухания)		14,7	0,34	0-2

Примечание. Продолжительность опытов составила 375 дней.

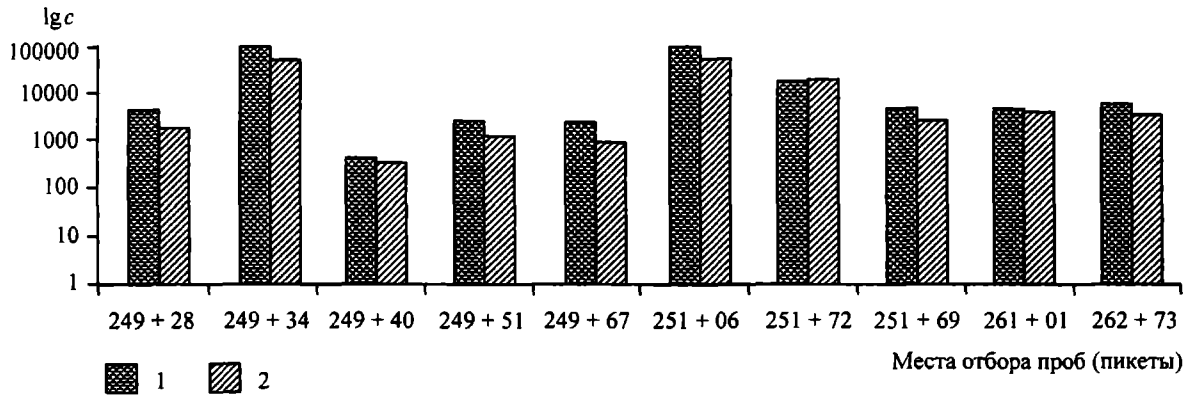


Рис.4. Характер изменения содержания хлоридов (1) и натрия (2) в водных вытяжках из разрушенных конструкционных материалов, отобранных в перегонном тоннеле трассы «Елизаровская – Ломоносовская»

тию пластических деформаций в верхнекотлинских глинах после взаимодействия с растворами, хотя их прочность снижается приблизительно одинаково в растворах и воде. Следует отметить, что в пределах тектонических разломов модуль общей деформации E_0 таких глин может снижаться от 180 до 20 МПа и более за счет высокой степени дезинтеграции пород, а также их дополнительного увлажнения водами вендского водоносного комплекса.

Особенно следует остановиться на специфике влияния минерализованных хлоридных натриевых вод на конструкционные материалы обделок и гидроизоляции перегонных тоннелей. Постоянное увлажнение гидроизоляционной рубашки минерализованными хлоридными натриевыми водами способствует их прогрессирующему разрушению. Известно, что даже плотные бетоны при давлении более 0,3 МПа становятся диффузионно проницаемыми для гидратированных ионов хлора и натрия.

Анализ химического состава водных вытяжек (более 100 проб), приготовленных из различных натечных форм и разрушенных конструкционных материалов, которые были отобраны в ходе обследования восьми перегонных тоннелей по четырем трассам глубокого заложения (вмещающая среда – верхнекотлинские отложения), 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 (рис.4). В пробах разрушенных железобетонных обделок часто фиксируются повышенные содержания кремниевой кислоты (до 0,3 г/дм^3) и алюминия (до $38 \cdot 10^{-3}$ г/дм^3), что свидетельствует об интенсивном выщелачивании компонентов цементного камня. Во многих случаях наблюдались значительные концентрации сульфатов (до 34,5 г/дм^3), которые

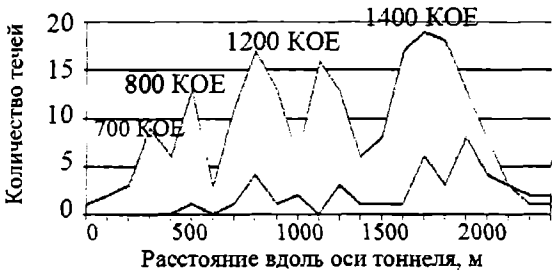


Рис.5. Связь активности водопроявлений по трассе «Елизаровская – Ломоносовская» с количеством определенных групп микромицетов (КОЕ)

связаны с разрушением и выносом гидросульфоалюмината кальция из гидроизоляционного слоя, а также с деятельностью тионовых бактерий.

Необходимо отметить, что состав вод вендского водоносного комплекса является благоприятным для развития микробиоты по следующим позициям: 1) присутствие в водах биогенных элементов – калия, азота в форме нитрата, фосфатов, а также соединений серы (сульфат-ион SO_4^{2-}), микрокомпонентов – железа, селена, бромида, бора; 2) нейтральный или близкий к щелочному pH водной среды вендского комплекса; микроорганизмы активно развиваются в отсутствии стрессов при pH = 6-9; 3) наличие радиоактивных элементов в подземных водах в небольших количествах способствует увеличению скорости метаболитических процессов; 4) присутствие в толще верхнекотлинских глин древней органики – водорослей Laminaria (источник углерода). Таким образом, постоянное восходящее перетекание минерализованных вод вендского водоносного комплекса будет активизировать деятельность микробиоты в трещиноватых глинах за счет поступления воды с дополнительными питательными компонентами и собственной природной микробиоты, что подтверждается значениями биологического потребления кислорода ($БПК_5$).

По трассам перегонных тоннелей, проложенных под тальвегами глубоких палеодолин, отмечается интенсивное разрушение чугуна тюбингов, в котором активное участие принимают микроорганизмы, что доказывается формой его разрушения – расслоением в результате процессов графитизации. Расслоенный чугун становится проницаемым для подземных вод, за счет чего происходит его обогащение хлоридными натриевыми солями. В пробах корродированного чугуна обращают на себя внимание высокие содержания хлоридов – до 4,3 г/дм^3, ионов натрия и калия – до 5,2 г/дм^3, а также сульфатов – до 2,73 г/дм^3 (перегонный тоннель «Черная речка – Пионерская»).

Анализы водных вытяжек разрушенных конструкционных материалов дали возможность убедиться в сложном характере природы их деградации: химические и физико-химические процессы протекают одновременно с биокоррозией. Подтверждением активной микробной деятельности служат аномально высокие значения ХПК (до 17960 мгO_2/дм^3) и $БПК_5$ (до 9114 мгO_2/дм^3) в водных вытяжках.

Исследования, проведенные совместно с д-ром биол. наук Д.Ю.Власовым (СПбГУ), 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), которые зафиксированы через несколько месяцев после ремонтных работ. Наибольшая интенсивность водопроявлений наблюдается в пределах участков перегонных тоннелей с высокими значениями КОЕ (рис.5).

Следует отметить, что применяемые в качестве гидроизоляционных материалов битумы часто оказываются нестойкими к биокоррозии. Особенно активно процессы деградации битумов прослеживаются на участках трасс перегонных тоннелей, пройденных под межморенными микулинскими отложениями, содержащими органику и генерирующими биохимические газы [2]. В процессе обследования такой трассы было зафиксировано размягчение битумов гидроизоляционного слоя и их вытекание на банкет. В ходе микробиологических исследований в деградированном битуме были определены микромицеты в количестве до 1100 КОЕ, а также гетеротрофные формы

бактерий, в том числе сульфатредуцирующие, тионовые, нитрифицирующие бактерии и железобактерии.

Поиск и разработка эффективных способов защиты конструкционных материалов перегонных тоннелей от биокоррозии представляет собой одну из актуальных задач повышения эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге. К числу таких способов относится применение специальных биоцидных добавок при изготовлении гидроизоляционных (тампонажных) растворов, нагнетаемых за обделку тоннелей. В СПбГУ под руководством д-ра биол. наук Д.Ю.Власова были проведены испытания 10 современных биоцидных препаратов отечественных и зарубежных производителей. В различных вариантах испытаний полное подавление деятельности микроорганизмов, культивируемых на питательных средах, зарегистрировано при добавлении биоцидных составов АНТИ-В, Ньюжавел и Биопаг-Д.

В заключение следует отметить, что при проектировании подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге необходимо принимать во внимание высокую агрессивность основных компонентов подземного пространства по отношению к конструкционным материалам обделок и гидроизоляции перегонных тоннелей. В геомеханических расчетах следует вводить поправку на снижение несущей способности тоннельных конструкций при длительном воздействии на них минерализованных хлоридных натриевых вод вендского водоносного комплекса, а также за счет биокоррозии. Для повышения эффективности ремонтных работ необходимы поиск и разработка биоустойчивых конструкционных материалов, в том числе гидроизоляционных и специальных покрытий для тюбингов и других типов железобетонных обделок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологические особенности коренных глин Санкт-Петербурга как среды для размещения подземных сооружений / Р.Э.Дашко, А.А.Еремеева // Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий: Материалы Международного симпозиума. Том 2. Екатеринбург: Изд-во «АКВА-ПРЕСС», 2001. С.675-681.

2. *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 // Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып.10 / ГЕОС. М., 2008. С.208-213.

3. *Кремнева Р.Н.* Инженерно-геологические и гидрогеологические условия сооружения Ленинградского метрополитена. // Вопросы инженерной геологии Ленинградского экономического района / Трест «Оргтехстрой». Л., 1960. С.99-108.

REFERENCES

1. *Dashko R.E.* The engineering geological features of parent clays in Saint Petersburg as bearing rocks of underground transport constructions / R.E.Dashko, A.A.Eremeeva // Engineering geological problems of urban lands: Proceedings of the International symposium. Vol.2. Ekaterinburg: «AQUA-PRESS», 2001. P.675-681.

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

3. *Kremneva R.N.* Engineering geological and hydrogeological conditions of Leningrad metropolitan construction // Issues of engineering geology of Leningrad economic region / «Orgtechstory». Leningrad, 1960. P.99-108.