УДК 624.131:551.3

О.Ю.АЛЕКСАНДРОВА
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*

ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В условиях интенсивного многоуровневого освоения подземного пространства Санкт-Петербурга остро стоит задача прогнозирования и диагностики экзогенных процессов на стадии проектирования, строительства, эксплуатации и реконструкции сооружений. Показана необходимость учета техногенных факторов, таких как химическое, микробное и температурное загрязнение геологической среды, оказывающих влияние на трансформацию состояния и прочности песчано-глинистых пород основания сооружений. Особое внимание уделено влиянию загрязнения коммунально-бытовыми стоками на свойства мореных суглинков и озерно-ледниковых глинистых отложений, которые используются в качестве несущего горизонта для свайных фундаментов и естественного основания для ленточных фундаментов зданий XVIII-XIX веков. Подчеркивается роль агрессивности подземной среды и биокоррозионных процессов в разрушении конструкционных материалов.

It is very important at the present time in conditions of multilevel developing Saint-Petersburg to have an opportunity of prediction and diagnostics exogenous processes during the designing, construction, maintenance and buildings reconstruction. It is shown the necessity of taking into consideration the man-caused factors as chemical, microbial and temperature pollution of geological environment, which is exerting influence on transformation of soils condition under the buildings foundation. The principal concern is attended to the pollution by domestic sewage influencing on moraine and lacustrine loam which is used as a base layers for pile foundations and natural bed for continuous footing of 18-19 centuries buildings. It is underlined the role of soils corrosion activity and the profound effect of biocorrosion processes in lining material destruction.

В Санкт-Петербурге стоит проблема многоуровнего освоения его подземного пространства с целью снижения экстенсивного развития городской инфраструктуры. Подземное пространство Санкт-Петербурга по интенсивности освоенности и глубине может быть разделено на два уровня. Первый уровень вмещает в себя подземные конструкции зданий, инженерные коммуникации и тоннели неглубокого заложения метрополитена. В условиях развития слабых песчано-глинистых пород в пределах погребенных долин зона основания наземных сооружений может быть весьма значительной. Например, самое тяжелое сооружение в Санкт-Петербурге – Исаакиевский собор, с глубиной заложения фундамента 5,0 м, массой 300 тыс.т, имеет зону основания до глубины 57 м, в пределах которой залегают верхнекотлинские глины верхнего венда, рассматриваемые как малосжимаемые породы. В настоящее время проектируется новое здание Мариинского театра с глубиной заложения фундамента 15,0 м, а также планируется строительство высотных зданий с глубоким заложением фундаментов.

При проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений не уделяется должного внимания прогнозу развития экзогенных процессов, несмотря на то, что более 70 % аварий и деформаций сооружений связано с особенностями их развития и (или) активизации.

В пределах первого уровня на стадии эксплуатации сооружений значение приобретает активизация такого опасного процесса, как неравномерные и длительные осадки. В практике проектирования сооружений считается, что давление от сооружения на водонасыщенные песчано-глинистые породы основания должно способствовать их уплотнению за счет фильтрационной консо-



Рис.1. Характер свободного набухания суглинка лужской морены (глубина 14,8-15,0 м) в воде (—●—) и концентрированных (—▲—) стоках

лидации и, соответственно, повышению параметров прочности. Анализ возможности применения фильтрационной консолидации, выполненный А.И.Ксенофонтовым (1973 г.), А.Л.Гольдиным (1973 г.), показал, что в глинах, имеющих коэффициент фильтрации менее 10^{-3} м/сут, мощность зоны, в которой возможна фильтрация воды из породы, снижается до нуля. По результатам многочисленных экспериментальных исследований, выполненных в Санкт-Петербургском горном институте, был определен градиент начала фильтрационной консолидации ($I_{нфк}$), который для малолитифицированных пылеватых глинистых пород может быть выражен эмпирической формулой $I_{нфк} = 100\sqrt{I_{\tilde{n}}}$, где M_c – содержание глинистой фракции в относительных долях [1]. Данное уравнение имеет определенный физический смысл: при отсутствии глинистой фракции $I_{нфк} = 0$. Содержание глинистой фракции определяет степень трансформации структуры воды в поле действия тонкодисперсных частиц и, соответственно, уровень ее «чувствительности» по отношению к восприятию внешнего давления. Кроме того, техногенные факторы, такие как химическое, микробное и температурное загрязнение геологической среды, снижают интенсивность процессов уплотнения грунтов.

В пределах исторического центра загрязнение подземного пространства происходит в основном за счет утечек из канализационных систем. Канализационные стоки характеризуются стабильным составом (NH_4^+ – 156 мг/л; Na^+ – 154,5 мг/л; K^+ – 8,4 мг/л; Ca^{2+} – 117,9 мг/л; Mg^{2+} – 30,6 мг/л; $Fe^{2+,3+}$ – 18,5 мг/л; NO_3^- – 1,3 мг/л, Cl^- – 251,0 мг/л; HCO_3^- – 895,0 мг/л; $ÐO_4^{2-}$ – 35,4 мг/л; H_2S – 1,3 мг/л; pH – 6,7; окисляемость ($KMnO_4$)– 11335 мг O_2/л, химическое потребление кислорода (ХПК) – 18928 мг O_2/л; биологическое потребление кислорода ($БПК_5$) – 9012 мг O_2/л; взвешенные вещества – 5154 мг/л), однако их минерализация может варьировать в зависимости от степени разбавления в грунтовых водах. С целью установления закономерностей изменения состояния и физико-механических свойств глинистых грунтов под воздействием утечек из систем водоотведения были проведены модельные опыты с образцами суглинков лужской, московской морены и озерно-ледниковыми глинами лужского возраста. Показатели физических свойств суглинков до опыта: свободное набухание $W_{наб}$ = 18,8 %, число пластичности I_p = 9,1 %, показатель консистенции I_L = 0,21. Свободное набухание этих отложений в стоках оказалось в 3 раза выше, чем в воде (рис.1). После взаимодействия со стоками во всех образцах отмечено увеличение числа пластичности и показателя консистенции.

Процесс набухания глинистых пород в канализационных стоках следует рассматривать как адсорбционный процесс с обязательным учетом диффузионно-осмотических явлений. Уравнение баланса влаги ($Q^{í\ 2î}_{íàá}$), поступающей в глинистый грунт при его взаимодействии с минерализованными стоками, может быть записано в виде [4] $Q^{í\ 2î}_{íàá} = Q^{í\ 2î}_{äèô} + Q^{í\ 2î}_{àäñ} - Q^{í\ 2î}_{îñì}$, где $Q^{í\ 2î}_{äèô}$, $Q^{í\ 2î}_{àäñ}$, $Q^{í\ 2î}_{îñì}$ – количество воды соответственно за счет диффузии гидратированных ионов, адсорбционной способности грунта и осмотического оттока поровой воды. При взаимодействии со стоками в образец за счет диффузии гидратированных ионов поступает большое количество органических и неорганических соединений биотического и абиотического генезиса, в связи с чем химическое потребление кислорода порового

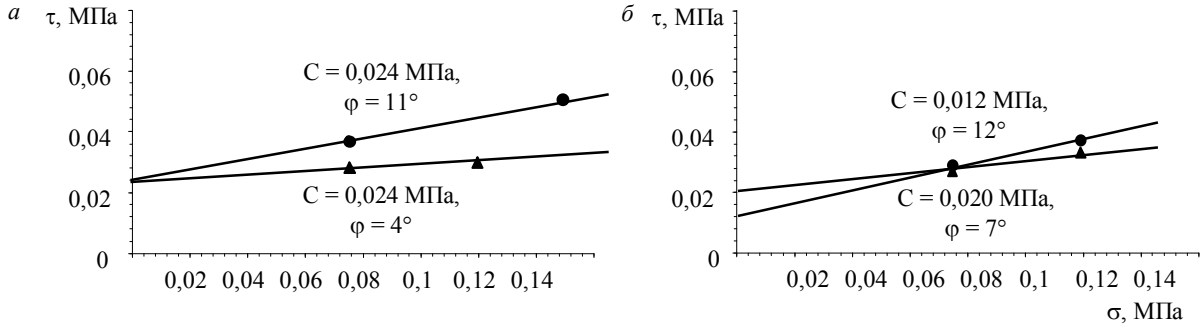


Рис.2 Изменение параметров сопротивления сдвигу (сцепления С и угла внутреннего трения φ) глинистых пород под влиянием набухания в коммунально-бытовых стоках: *а* – суглинки лужской морены, глубина 14,8-15,0 м; *б* – озерно-ледниковые глины, глубина 23,1-23,3 м

—●— до набухания; —▲— после набухания

раствора морены увеличилось с 37,6 до 188 мг O_2/л. При этом отмечается увеличение показателя $БПК_5$ в поровой воде в 4 раза. О росте микробной активности в образцах после их взаимодействия со стоками говорит и бактериальная масса (БМ), которая, например, в суглинках лужской морены возросла с 69 до 306 мкг/г. Несмотря на то, что набухание всех исследуемых типов отложений в концентрированных стоках не превышало 1,5 %, что по ГОСТ 25100-95 относит их к ненабухающим грунтам, взаимодействие со стоками вызвало резкое снижение прочности (рис.2).

Угол внутреннего трения снизился более чем в 2 раза с некоторым увеличением сцепления для более слабых озерно-ледниковых глин. В процессе взаимодействия с канализационными стоками у всех исследуемых типов отложений возросла пластическая составляющая деформации сдвига. Необходимо отметить, что загрязнение канализационными стоками способствует снижению коэффициента фильтрации песчаных пород в верхней части разреза города и формированию у них плывунных свойств [4]. Повышенная температура стоков рассматривается как катализатор активизации микробной деятельности. Кроме того, поступление с канализационными стоками большого количества органических соединений определяет снижение окислительно-восстановительного потенциала, что наряду с преобразованием кислотно-щелочных условий при активизации микробной деятельности приводит к снижению прочности и модуля общей деформации пород основания [4]. Подобные изменения будут способствовать развитию дополнительных неравномерных осадок зданий и сооружений. В пределах откосов рек и каналов наблюдается активизация оползневых смещений. На Петровском стадионе, где отсутствует система отвода стоков, и их сброс осуществляется непосредственно в Малую Неву, происходит разрушение набережных в результате оползневых смещений, а также активной коррозии бетонов и строительных растворов [2].

На стадии эксплуатации сооружений изменение напряженного состояния в зоне основания может быть связано с варьированием напоров в водоносных горизонтах. В последнее время прекращение использования Полюстровского месторождения минеральных вод повлекло за собой восстановление напоров и спустя некоторое время в результате перетекания через водоупор моренных суглинков вызвало образование грифонов на улицах, подтопление фундаментов зданий, изменение напряженного состояния пород в основании за счет взвешивающего эффекта. С другой стороны, строительное водопонижение в водоносных горизонтах будет способствовать росту эффективных напряжений в толще пород основания сооружений, что провоцирует развитие осадок, особенно при наличии в разрезе малолитифицированных сжимаемых отложений, в том числе торфов.

С целью предотвращения опасных аварийных ситуаций на стадии строительства необходимо делать прогноз развития таких геологических процессов, как плывуны, суффозионные явления при проходке котлованов в историческом центре, где в верхней части разреза повсеместно прослеживаются тонкозернистые пылеватые пески, обогащенные природной, техногенной органикой и микробиотой. Активизация микробной деятельности часто сопровождается газообразованием, в том числе таких малорастворимых газов, как метан и азот, что при условии накопления в песках способствует их подвижности. На территории города и вокруг него Газовым бюро было установлено около 20 участков, где бурение скважин сопровождалось выделением газов, газогрязевыми выбросами, а также возгоранием газов [5]. Природная и природно-техногенная газогенерация отмечалась во многих районах города при вскрытии котлованов и бурении скважин.

Второй уровень освоения, глубиной 50 м и более, вмещает б□льшую часть перегонных тоннелей метро, а также глубокие канализационные коллекторы и очистные сооружения. На этой глубине вне погребенных долин имеет значение зонально построенная по глубине толща трещиноватых коренных отложений венда и кембрия [3], в пределах глубоких палеоврезов (пл. Мужества, устье р.Смоленки, р.Большая Нева) – четвертичные отложения нижней части разреза (московская морена, межледниковые отложения, днепровская морена) и коренные породы. Комплексное влияние природно-техногенных процессов на устойчивость сооружений изучается в перегонных тоннелях петербургского метрополитена, которые испытывают знакопеременные деформации, разрушение обделок, течь подземных вод, образование сталактитов и вынос тампонажного раствора. Сопоставление характера и размеров замеренных перемещений и типов новообразований на тюбингах тоннелей с инженерно-геологическим разрезом, газо- и гидродинамическими условиями показало их взаимосвязь. Разрушение тюбингов обделки вызвано биокоррозионными процессами, что подтверждается результатами химического состава водных вытяжек из новообразований, где отмечено высокое содержание органических соединений ХПК ≤ ≤ 2300 мг O_2/л и $БПК_5$≤ 1500 мг O_2/л. В разрушенных материалах выявлено присутствие микромицетов, нитрифицирующих, тионовых и железобактерий – активных биодеструкторов бетонных и металлических конструкций.

В заключение необходимо отметить, что в разделе ТСН 50-302-2004 по Санкт-Петербургу, посвященном геодинамическим процессам, отсутствует ряд действующих в подземном пространстве процессов, которые необходимо прогнозировать и предупреждать на стадии проектирования, строительства, эксплуатации и реконструкции сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологический анализ процесса консолидации водонасыщенных глинистых пород // Инженерная геология. 1981. № 1.

2. *Дашко Р.Э.* Анализ причин разрушения набережных на Петровском стадионе / Р.Э.Дашко, О.Ю.Александрова // Реконструкция городов и геотехническое строительство. СПб: Издательский дом KN+, 2000. № 2.

3. *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологические особенности коренных глин Санкт-Петербурга как среды для размещения подземных сооружений / Р.Э.Дашко, А.А.Еремеева // Мат. международ. симпозиума «Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий». Екатеринбург: Изд-во «Аква-Пресс», 2001.

4. *Дашко Р.Э.* Проблемы геоэкологии в геотехнике // Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство. СПб: Изд-во АСВ, 2003-2004 № 7.

5. *Краснов И.И.* Газы четвертичной толщи предглинтовой полосы Ленинградской области // Природные газы СССР. М.- Л., 1935.