УДК 624.131:551.252

Р.Э.ДАШКО, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, regda2002@mail.ru*
А.В.ШИДЛОВСКАЯ, *канд. геол.-минерал. наук, доцент, shidanna@bk.ru*
К.В.ПАНКРАТОВА, *аспирант, pan-ksenia@yandex.ru*
А.М.ЖУКОВА, *аспирант, zhuanna85@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

R.E.DASHKO, *Dr. in geol. & min. sc., professor, regda2002@mail.ru*
A.V.SHIDLOVSKAIA, *PhD in geol. & min. sc., associate professor, shidanna@bk.ru*
K.V.PANKRATOVA, *post-graduate student, pan-ksenia@yandex.ru*
A.M.ZHUKOVA, *post-graduate student, zhuanna85@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА МЕГАПОЛИСОВ И ЕЕ УЧЕТ В ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ (НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА)

Рассмотрены инженерно-геологические и гидрогеологические особенности разреза Санкт-Петербурга. Отмечено, что при проектировании сооружений различного назначения с целью обеспечения их длительной устойчивости необходимо анализировать возможность трансформации основных компонентов подземного пространства (горные породы, подземные воды, газы, микробиота, подземные конструкции) под влиянием природных и техногенных факторов. Приведены примеры преобразования песчано-глинистых грунтов при изменении физико-химических условий и активизации микробной деятельности в подземной среде. Проанализирован случай перехода тяжелого сооружения в предаварийное состояние из-за ошибок в инженерных исследованиях и некорректных назначений расчетных параметров.

Ключевые слова: подземное пространство, преобразование грунтов, подземные воды, загрязнение, микробиота, длительная устойчивость, расчетные параметры.

TECHNOGENIC TRANSFORMATION OF THE BASIC COMPONENTS OF MEGACITIES UNDERGROUND SPACE AND ITS ACCOUNT IN GEOMECHANICAL CALCULATIONS (ON THE EXAMPLE OF SAINT PETERSBURG)

Engineering-geological and hydro-geological features of rent of St. Petersburg are considered. It is noted that at designing buildings for different purposes, in order to ensure their long-term stability it is necessary to analyze the possibility of their transformation the main components of underground space (rocks, underground water, gas, microbiota, underground structures) under the influence of natural and technogenic factors. Examples of transformation of sand-clay soils under the influence of physical and chemical conditions change and activization of microbial activity in underground space are given. The case of transition of a heavy construction to a pre-emergency condition because of mistakes in engineering research and incorrect assigning of computative parameters is analyzed.

Key words: underground space, the transformation of soils, ground water, contamination, microbiota, long-term stability, computative parameters.

В настоящее время повышение уровня безопасности освоения и использования подземного пространства в мегаполисах предполагает необходимость его рассмотрения как компонентной системы, при этом негативное изменение каждой ее составляющей под воздействием природных и техногенных факторов, в том числе и инженерной деятельности человека, может привести к нарушению условий нормального функционирования подземных и наземных сооружений. К основным компонентам подземного пространства следует отнести горные породы (грунты), подземные воды водоносных горизонтов и водоупоров, газы различного генезиса, микроорганизмы и подземные конструкции различного назначения. Все перечисленные компоненты находятся в определенной взаимосвязи и взаимовлиянии.

В разрезе подземного пространства Санкт-Петербурга преобладают водонасыщенные малолитифицированные песчано-глинистые отложения, которые должны классифицироваться как весьма уязвимые и обладающие высокой степенью чувствительности по отношению к воздействию изменения напряженно-деформированного состояния толщи грунтов, контаминации компонентов подземного пространства, активизации деятельности подземной микробиоты, термодинамических условий за счет тепловыделяющих эффектов подземных и наземных сооружений и др. При прогнозировании инженерно-геологических и гидрогеологических условий обычно не учитывается преобразование окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий в водонасыщенных грунтах, взаимодействующих с сооружениями, которые негативно влияют на параметры физико-механических свойств, в первую очередь на их прочность и деформационную способность, а также способствуют развитию ряда процессов. Так, например, анаэробная обстановка в подземной среде ускоряет коррозию металлов за счет активного протекания электрохимических явлений, ускорения накопления бактериальной массы в водонасыщенных грунтах.

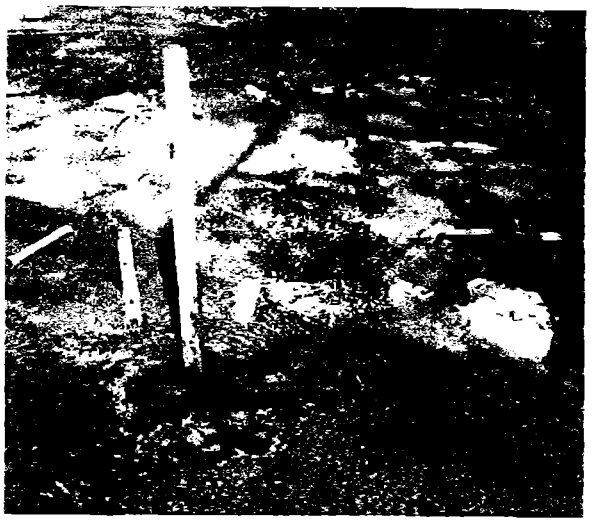
Малолитифицированные песчано-глинистые отложения четвертичного возраста при анализе их взаимодействия с сооружениями следует рассматривать как тонкопористую среду с ярко выраженными реологическими свойствами, прежде всего явлениями ползучести. Большая часть водонасыщенных глинистых грунтов четвертичной толщи в практике расчетов устойчивости, как показывают результаты экспериментальных исследований, должна анализироваться как квазипластичная среда с углом внутреннего трения $\varphi < 5°$

Пески в разрезе четвертичной толщи могут быть разделены на два типа – истинные и «ложные» плывуны. К истинным плывунам относится вся толща после- и позднеледниковых песков, прежде всего залегающих под болотными отложениями. Такие пески содержат привнесенные при инфильтрации болотных вод коллоидные фракции органического вещества абиогенного и биогенного генезиса, что способствует снижению их коэффициента фильтрации до 10^{-2} м/сут и менее и нулевой водоотдаче. Наличие подобных песков в верхней части разреза приводит к большим осложнениям при производстве работ нулевого цикла за счет некорректной их трактовки при выполнении инженерных исследований, отсутствия нормативов для проверки и подтверждения плывунных свойств. Исследование таких водонасыщенных песков в одноплоскостных сдвижных приборах, в которых наблюдается их интенсивное уплотнение под действием нормальных давлений, создающих экстремально высокие градиенты напора, приводит к получению углов трения $\varphi > 30°$ Использование в расчетах завышенных показателей прочности водонасыщенных песков-плывунов предопределяет принятие проектных решений по оградительным конструкциям глубоких котлованов, неадекватных реальным условиям работы закрепленных откосов, находящихся под действием давлений «тяжелой жидкости» – плывунов. К «ложным» плывунам обычно относятся пески, находящиеся под воздействием высоких гидродинамических давлений.

Коренные породы осадочной толщи – трещиноватые глины нижнего кембрия и верхнекотлинские глины венда, а также песчаники того же возраста в расчетных схемах устойчивости сооружений должны рассматриваться как трещиновато-блочная среда. Результаты лабораторных исследований прочности и деформационной способности таких глин имеют низкий уровень достоверности, поскольку не учитывается дискретность и дезинтеграция этих отложений за счет трещиноватости различного генезиса (тектоническая и нетектоническая), значительно снижающая сцепление таких грунтов и величину модуля общей деформации. Кроме того, наблюдается существенный разброс показателей механических свойств в толще из-за неравномерного распределения микро- и макротрещиноватости, а также варьирования механических свойств отдельных блоков.

Изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива в подземном пространстве мегаполисов необходимо рассматривать с позиции не только влияния различных статических и динамических нагрузок при строительстве и функционировании наземных и подземных сооружений, как обычно анализируется в геомеханике и механике грунтов, но и существенного влияния гидродинамических условий безнапорных и напорных водоносных горизонтов в толще пород. Например, в разрезе подземного пространства Санкт-Петербурга насчитывается шесть поэтажно расположенных водоносных горизонтов, два из которых имеют региональное развитие, в том числе грунтовые воды и вендский (нижнекотлинский) водоносный комплекс, оказывающие, кроме механического, коррозионное воздействие на подземные конструкции сооружений различного назначения.

Локальное развитие в северо-восточной и восточной части города (правый берег р.Невы) имеет межморенный (полюстровский) водоносный горизонт, в том числе и Полюстровское месторождение минеральных вод, в настоящее время не эксплуатирующееся из-за интенсивного его загрязнения. В пределах Полюстровского месторождения минеральных вод восстановились первоначальные пьезометрические уровни горизонта выше земной поверхности, что сопровождается в настоящее время восходящим перетеканием железистых вод через толщу относительного водоупора и образованием грифонов на земной поверхности (см. рисунок). При ведении работ нулевого цикла в районе месторождения прорывы таких вод возможны даже при относительно неглубоком заложении котлована (4-5 м).



Грифоны напорных вод Полюстровского месторождения на ул. Ключевой (фото В.П.Вершинина, 2007)

Негативная трансформация состояния и физико-механических свойств толщи песчано-глинистых грунтов происходят при их загрязнении утечками из водоотводящих систем, захороненных болот и свалок хозяйственно-бытовых отходов. Следует отметить, что органическая составляющая канализационных стоков (белки, жиры, углеводы) составляет 58 %, а минеральная – только 42 %, стоки характеризуются высоким содержанием взвешенного материала биогенного и абиогенного происхождения. В 1 мл канализационных стоков содержится 10^7-10^8 клеток микроорганизмов. Даже коренные литифицированные глины значительно снижают характеристики сопротивления сдвигу под действием канализационных стоков в течение достаточно короткого времени (табл.1). Трещиноватость этих глин способствует инфильтрации стоков под дей-

Таблица 1

Изменение прочности нижнекембрийских глин под воздействием канализационных стоков и воды

Характеристика жидкой фазы, взаимодействующей с глинами	Пределы пластичности		Число пластичности I_p, %	Пластическая прочность P_m, МПа	Параметры прочности	
	$W_т$, %	W_p, %			c, МПа	φ, град
Дистиллированная вода	42,7	18,1	24,6	0,37-0,53	0,08-0,086	0-5
Коммунально-бытовые стоки	46,2	20,1	26,1	0,04-0,06	0,042-0,05	0

Примечание. Параметры сопротивления сдвигу глин до набухания в воде и стоках: c = 0,14-0,16 МПа; φ = 5-10°.

ствием малых градиентов напора на глубину 10-20 м.

Под болотами прочность нижнекембрийских глин может снижаться до 0,03-0,035 МПа при нулевом значении угла внутреннего трения, при этом содержание бактериальной массы превышает 200 мкг/г.

Сорбция взвешенного материала водонасыщенными песками и развитие микробиоты при взаимодействии с компонентами канализационных стоков постепенно переводит их в состояние истинных плывунов. Интенсивное влияние оказывает также активность микробной деятельности, сопровождающаяся накоплением бактериальной массы. Изменение величин коэффициента фильтрации мелкозернистых и среднезернистых песков при накоплении бактериальной массы* показано ниже:

Содержание БМ, мкг/г	Значение $k_ф$, м/сут	Характеристика песков
0	3-15	Отсутствие плывунных свойств
25	0,01	Снижение водоотдачи
50	0,001	Переход в состояние плывунов
75	0,005	То же
100	0,0075	
125	0,0001	

Наличие либо дополнительное поступление органических соединений в подземную среду способствует снижению окислительно-восстановительного потенциала Eh до отрицательных значений. В таких условиях наблюдается восстановление оксидного железа в дисперсных грунтах, что сопровождается разрушением в них цементационных связей, поскольку соединения Fe^{2+} растворимы в воде. Проведенные экспериментальные исследования показали, что кембрийские песчаники, сцементированные гидрооксидами железа, имеющие c = 0,25-0,44 МПа и φ = 16°, в восстановительной среде при воздействии стоков, содержащих органические соединения и микробиоту, трансформировались в глинистые пески с c = 0,05 МПа и φ = 8°. Такие исследования выполнялись для оценки устойчивости намывных дамб хвостохранилищ обогатительных фабрик, в жидкой фазе которых содержится дизельное топливо, как один из реагентов флотации, и микробиота природного и техногенного генезиса. При воздействии воды в аэробных условиях параметры сопротивления песчаников снизились только на 20 %.

Процессы в подземном пространстве, вызванные деятельностью микроорганизмов, могут активизироваться за счет природной и привнесенной микробиоты, развивающейся при дополнительном поступлении питательных субстратов с поллютантами (органическими и неорганическими), тепловыделения сооружений различного назначения, эксгаляции глубинного радона, способствующей интенсификации метаболической деятельности микроорганизмов*. В условиях полной деградации органического материала гетеротрофными формами микроорганизмов наблюдается биохимическая газогенерация малорастворимых (метан, азот, реже водород) и (или) растворимых газов (диоксид углерода, сероводород).

* *Дашко Р.Э.* Микробиота в геологической среде: ее роль и последствия // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии; ГЕОС. М., 2000. С.72-77.

Dashko R.E. Microbiota in the geological environment: its role and consequences //Sergeevsky readings. Materials of year session of scientific council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology; GEOS. Moscow, 2000. P.72-77.

Таблица 2

Величины расчетного сопротивления моренных отложений в основании здания в зависимости от изменения параметров сопротивления сдвигу*

Показатели	Параметры прочности		Величина расчетного сопротивления R моренных суглинков в основании, МПа	Давление от сооружения P_c, МПа
	c, МПа	φ, град		
Проектные решения	0,015	25	0,73	0,43-0,52
Результаты экспертизы	0,033	5	0,27	

Примечание. Экспертиза проводилась Р.Э.Дашко.

Депонирование малорастворимых газов в толще песчано-глинистых пород способствуют их разуплотнению и формированию газодинамического давления, что имеет принципиальное значение при вскрытии глубоких котлованов, в которых могут проявляться прорывы газов с выбросом грунта и воды, сопровождающиеся самовозгоранием при превышении критического содержания метана в воздухе. Накопление CO_2 в подземных водах будет приводить к развитию углекислой коррозии бетонов. В пределах подземного пространства Санкт-Петербурга следует различать природное газообразование, связанное с геологической историей развития региона (метаногенерирующие микулинские межледниковые отложения и литориновые пески с высоким содержанием органики, азотогенерирующие песчаники верхнего венда), и техногенную газогенерацию при загрязнении водонасыщенных песчано-глинистых пород органическими соединениями, которые нетоксичны для микроорганизмов и могут ими утилизироваться по полной схеме: органическое вещество – спирты – кетоны – органические кислоты – газы.

Геомеханические расчеты устойчивости сооружения должны предваряться обязательным анализом основных тенденций негативных изменений состояния и физико-механических свойств водонасыщенных глинистых грунтов под воздействием техногенных факторов, в том числе микробной пораженности, а также прогнозом развития процессов, опасных для сооружения в период его строительства и эксплуатации.

В качестве иллюстрации можно привести результаты экспертизы промышленного здания, которое перешло в предаварийное состояние еще до начала его эксплуатации за счет развития больших и неравномерных осадок в течение 14 лет. Здание с глубоким подвалом было возведено на фундаменте – плите шириной 20 м и длиной 103 м на месте ликвидированной свалки отходов мясокомбината, которая функционировала более 40 лет. Здание было разделено осадочными швами на три части. В основании залегали трансформированные под воздействием восстановительной среды и активной деятельности микроорганизмов водонасыщенные моренные суглинки мягкопластичной консистенции с влажностью 20-23 %. На стадии проектирования в расчетах допускаемых давлений на основание проектировщиками были использованы параметры сопротивлению сдвигу, полученные при массовых испытаниях моренных суглинков для условий их полной консолидации под действием давления от сооружения, при этом расчетное сопротивление составило 0,73 МПа (табл.2). Прогнозируемая осадка с использованием компрессионного модуля общей деформации не превышала проектной величины, равной 15 см.

Однако еще на стадии строительства, когда давление от сооружения превысило половину проектной величины, началась интенсивная и неравномерная осадка здания, за которой велись геодезические наблюдения в течение 14 лет. Величина осадки варьировала в пределах контура здания от 20 до 58 см. Бурение и инженерно-

* *Дашко Р.Э.* Механика горных пород: Учебник для вузов. М.: Недра, 1987. 264 с.

Dashko R.E. Rock mechanics: Textbook for high schools. Moscow: Nedra, 1987. 264 p.

геологические исследования, проведенные для оценки изменения состояния водонасыщенной морены в основании сооружения, дали возможность сделать вывод о том, что фильтрационная консолидация грунтов не наблюдалась, о чем свидетельствует отсутствие изменения их влажности и плотности. Для определения расчетного сопротивления морены на стадии экспертизы были использованы параметры сопротивления сдвигу, полученные в условиях трехосного сжатия на образцах большого диаметра по схеме неконсолидированно-недренированных испытаний (табл.2). Для таких условий, отвечающих особенностям работы преобразованных морен под действием физико-химических и биогенных факторов, расчетное сопротивление составило лишь 0,27 МПа, что значительно меньше действующего давления от сооружения, равного 0,43 МПа. Следовательно, грунты основания деформировались в нелинейной стадии ($R < P_c$) в условиях развития деформаций под действием не только нормальных, но и касательных напряжений. Деформации грунтов в основании протекали за счет бокового распора и отдавливания пластичных грунтов из-под фундамента – плиты. Выполненный анализ показал, что эксплуатация такого сооружения может быть обеспечена только в условиях изменения типа фундамента – устройства свайного поля из буронабивных свай, несущим горизонтом для которых могли служить нижнекембрийские глины, залегающие в основании здания на глубине 12 м.