

N1, 1999

## Геотехнические аварии в Петербурге

**А.Б.Фадеев**

Для грунтовых условий Петербурга характерно наличие двадцатипяти-тридцатиметровой толщи водонасыщенных надморенных отложений, представленных пылеватými песками и текучими суглинками морского и озерно-ледникового происхождения, местами заторфованными, с модулем деформации 3,5-5,5 МПа.

Здания высотой до 7 этажей обычно возводятся на ленточных фундаментах, опирающихся на верхний слой пылеватых песков. Более высокие дома, как правило, опираются на сваи, заглубленные в морену. Несколько зданий возведено на плитах без свай, но при неглубоком заложении плит они получали значительные (до 50 см и более) осадки. При новом строительстве в исторической части города часто возникают повреждения существующих зданий либо в процессе выполнения котлованных работ, либо при деформировании здания в воронке оседания нового сооружения.

Ввиду легкой разрабатываемости кембрийских глин режущим инструментом проходческих щитов, устойчивости этих глин в обнажениях и полной водонепроницаемости, именно в них располагается большинство тоннелей и станций самого глубокого в России петербургского метрополитена. Однако на перегоне между станциями "Лесная" и "Площадь Мужества" в кембрийских глинах имеется глубокий древний размыв, заполненный четвертичными грунтами с пльвунными свойствами. Хотя петербургские метростроители имеют опыт проходки наклонных эскалаторных тоннелей сквозь четвертичную толщу, на этом участке с интервалом в двадцать один год произошли две аварии, вызванные разными причинами, но приведшие к одинаковым последствиям: затоплению тоннелей и просадкам дневной поверхности.

### 1. Авария на Малой Дворянской улице 1994 года

На Петроградской стороне на Малой Дворянской ул. велось строительство нового семиэтажного дома с подземным этажом, к которому вплотную примыкает пятиэтажный дом №6, являющийся памятником архитектуры. Новый дом имеет плитный фундамент с размерами 60х60 м в плане с глубиной заложения 4,2 м. Грунтовые условия строительной площадки аналогичны описанным выше. Ожидавшаяся проектной организацией осадка составляла по разным вариантам расчета 15-20 см. Для защиты дома №6 проектировщиками было принято решение об устройстве разделительной стены в виде ряда железобетонных буронабивных свай диаметром 1,2 м и длиной 23 м (рис.1), в процессе изготовления которых непрерывно наблюдались оседания дома №6. К моменту завершения устройства стены дополнительные аварийные осадки существующего здания достигли 96 мм, в результате чего дом был расселен. Анализ геотехнического механизма развития больших осадок при устройстве буронабивных свай большого диаметра показывает, что в пльвунных грунтах имеет место наплыв грунта в проходимую скважину и выемка из нее объема грунта большего, чем объем скважины.

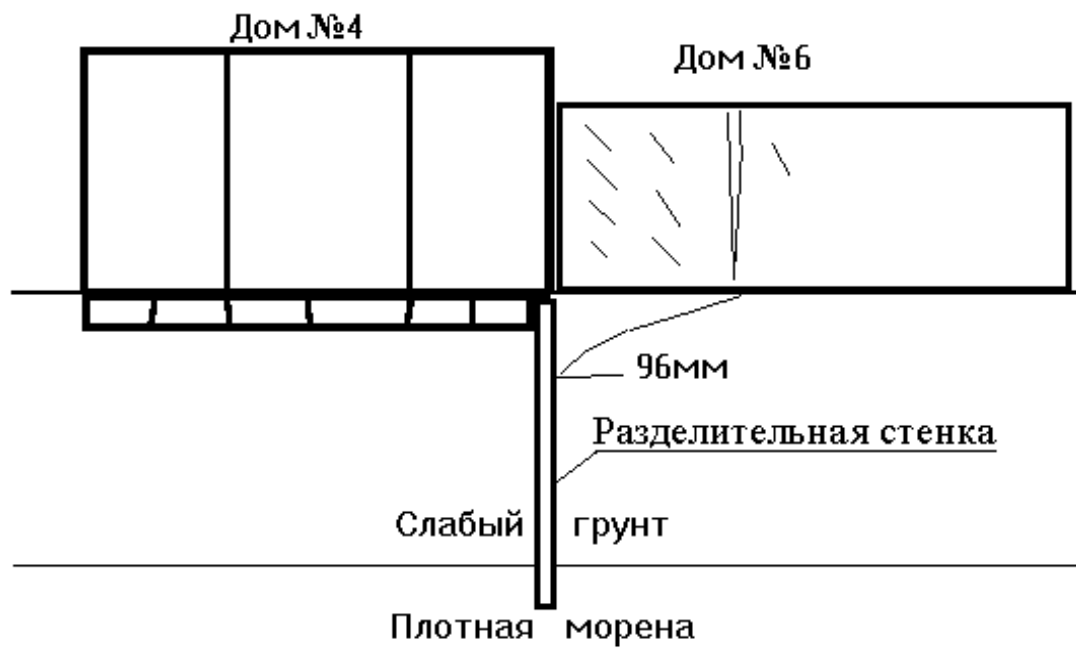


Рис.1. Ситуация на М. Дворянской улице

Но самым интересным итогом рассмотренной ситуации является тот факт, что осадка законченного к настоящему времени дома №4 вместо ожидавшейся по расчету осадки 15-20 см составила всего 1-1,8 см, причем максимальная осадка 1,8 см приходится на участок здания, примыкающий к буронабивным сваям. Никаких мер защиты дома №6 вообще при такой осадке не требовалось, достаточно было выполнить надежное крепление стены котлована. Впустую затрачены деньги на устройство дорогой свайной стены и попутно разрушен многоквартирный дом.

Причина почти десятикратной ошибки в прогнозе осадок кроется в несовершенстве используемых методов их расчета. Как известно, рекомендуемые СНиП 2.02.01-83 метод послойного суммирования и метод сжимаемого слоя предусматривают при ширине котлована до 10 метров выполнять расчет осадок от действия , то есть веса сооружения за вычетом веса грунта, извлеченного при устройстве заглубленной части сооружения, а при большей ширине - от действия , то есть веса сооружения без вычета веса извлеченного грунта. Таким образом для больших в плане зданий СНиП исключает возможность строительства безосадочных зданий с "плавающим" фундаментом, когда вес извлеченного грунта равен весу здания.

В данном случае вес сооружения составляет 36000 тонн, а вес извлеченного грунта на площади  $60 \times 60 = 3600 \text{ м}^2$  и на глубину 4,2 м равен 29000 тонн. При этом полное давление по подошве плитного фундамента составляет  $10 \text{ т/м}^2$ , а дополнительное давление -  $2 \text{ т/м}^2$ . Соответственно, и рассчитанные осадки при низких модулях деформации грунтов для полного давления составляют около 15 см, что и получили проектировщики при буквальном следовании методике СНиП, а для дополнительного давления - около 3 см (если игнорировать примечание к методикам СНиП об использовании полного давления при расчете осадок фундаментов шириной более 10 м).

Таким образом, рассматриваемая аварийная ситуация показала, что даже в самых неблагоприятных условиях слабых грунтов возможна реализация безосадочного строительства зданий с подземными этажами. Это для Петербурга чрезвычайно актуально, так как уже целый ряд спроектированных и построенных в последние годы зданий с подземными гаражами и сплошными фундаментными плитами был дополнительно посажен на дорогостоящие сваи из-за ожидания больших осадок, рассчитанных по СНиП.

Нужно отметить, что возведение фундаментов нового дома велось быстро и аккуратно: котлован разрабатывался с водопонижением, его откопка производилась захватками, сразу велось бетонирование плиты, и, несмотря на зимнее время, промораживания основания не допускалось.

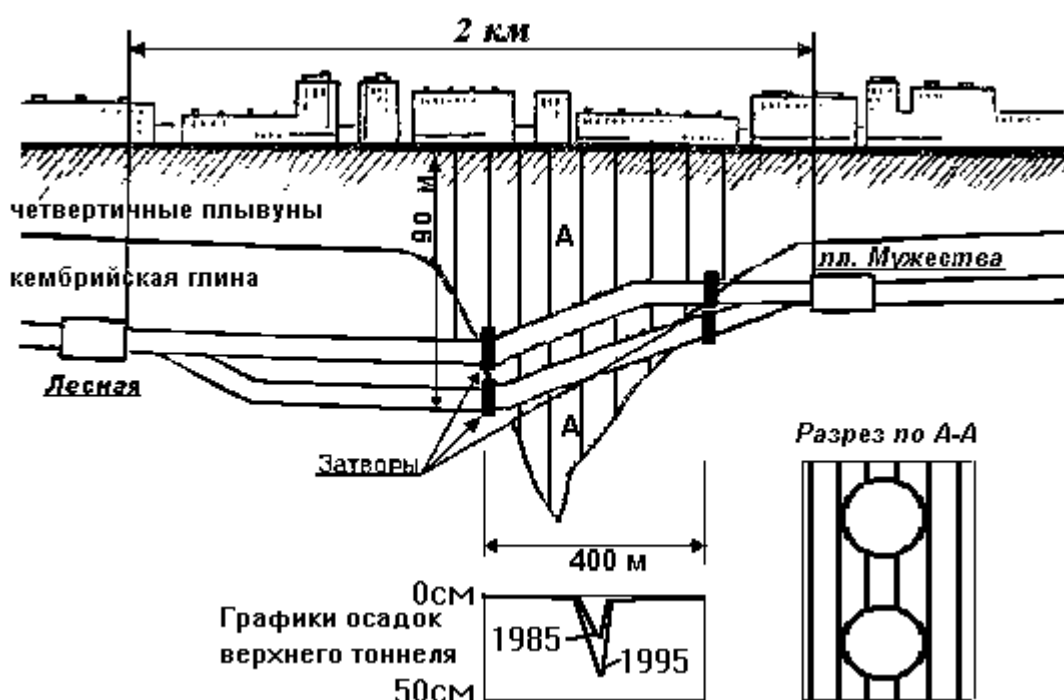
Изложенные факты позволяют внести предложение: исключить из Приложения 2 к СНиП 2.02.01-83 текст примечания “для фундаментов шириной  $b=10$  м принимается  $p_0=p$ ” и включить следующий текст: “Изложенный метод расчета осадок фундаментов применим при условии сохранения первоначальной структуры грунтов в основании. Если же в результате длительного существования котлована в открытом состоянии допущено расструктурирование (размокание, промораживание) его днища, то расчеты должны быть уточнены с новыми пониженными значениями деформационных характеристик верхнего слоя”.

Однако даже в случае расструктурирования днища и возникновения больших осадок возводимого здания образование соответствующей воронки оседания за его пределами не будет иметь места, то есть эти осадки не будут опасны для соседних домов.

## 2. Авария на строительстве метро 1974 года

Проходка тоннелей через древний размыв в кембрийских глинах, заполненный плавунными четвертичными грунтами, велась в массиве, замороженном рассольным методом через пробуренные с поверхности скважины. Чтобы уменьшить объем промораживания тоннели были расположены один над другим (рис.2).

Примерно на середине размыва забои проходимых параллельно тоннелей встретили непромороженный грунт. По рассказам очевидцев накануне аварии рабочими отмечался необычно мягкий грунт. Первым признаком аварии было медленное, затем все ускоряющееся выпучивание груды забоя, которое вскоре перешло в течение пастообразной грунтовой массы сначала в один, а потом и в другой тоннель. В аварийном порядке на удалении более километра от забоя тоннелей были сооружены бетонные перемычки, и в итоге в тоннели вытекло около 44 тыс. кубометров грунта. Осадки поверхности в центре мульды оседания достигли нескольких десятков сантиметров, многие поверхностные здания были серьезно повреждены.



*Рис.2. Схема расположения тоннелей в районе размыва и графики осадок верхнего тоннеля после оттаивания в 1985г и к моменту затопления в декабре 1995г.*

При расследовании аварии в качестве наиболее вероятной причины образования непромороженной зоны в середине хорошо промороженной трассы указывалось проникновение рассола в затрубное пространство и засоление грунта, что понизило температуру его замерзания.

После аварии грунт в призабойных участках вокруг тоннелей был повторно заморожен, но теперь уже жидким азотом, тоннели очищены от грунта, и проходка в 1975 г успешно завершена с использованием опережающего азотного замораживания. Около тысячи замораживающих труб, как показано на рис. 2, остались в массиве и подпирали тоннели сверху и снизу. Начиная с этого времени метростроители Петербурга постоянно и весьма успешно применяют азотное замораживание, которое обычно называется "криогенной технологией".

Уроки данной аварии можно свести к следующему.

Обеспечение полной герметичности замораживающих колонок, исключаяющей какое-либо засоление затрубного грунта - задача очень сложная и, можно считать, почти недостижимая. В то же время засоление грунта вследствие протечки является фатальным, так как это засоление ликвидировать невозможно, и образование непромороженной зоны является в такой ситуации неизбежным. Эти соображения дают основание считать рассольный способ замораживания крайне опасным и неприемлемым для геотехнического строительства в Петербурге, а азотное замораживание, получающее все более широкое распространение в мире - единственно приемлемым.

### **3. Авария на действующей линии метро 1995 года**

Оттаивание глубоко промороженных грунтов после завершения проходки уже в период эксплуатации длилось около 10 лет и при этом тоннели испытывали оседание вместе со всей грунтовой толщей. Оседания по длине тоннелей были неравномерны, в основном они были приурочены к отрезку длиной около 50 м в районе прорыва 1974 года и достигли 16 см (см. рис.2). На этом участке вскоре начались интенсивные притоки воды.

Следует заметить, что подобные неравномерные оседания наклонных эскалаторных тоннелей, пройденных через замороженные четвертичные грунты, наблюдаются всегда, и порой за период оттаивания грунта приходится производить несколько подчеканок тубинговых стыков для остановки протечек воды. К сожалению, принятие эффективных мер по прекращению водопритока на рассматриваемых тоннелях было затруднено.

Обделка тоннелей на участке размыва была выполнена в виде трехслойной конструкции (рис.3): наружный слой - чугунные тубинговые кольца, внутренний слой - стальная облицовка из сваренных листов толщиной 6-8 миллиметров, между ними - бетонное заполнение. К листам облицовки приварены стержни-анкеры, имеющие целью крепление облицовки к бетону.

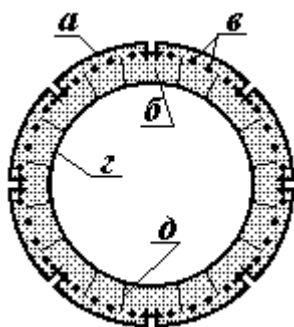
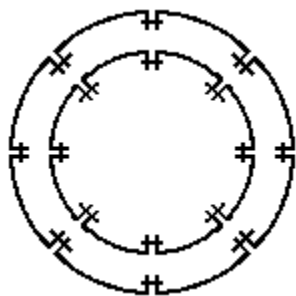


Рис.3. Конструкция обделки: а - кольцо тубингов, б - бетон, в - арматурные стержни, г - облицовка из стального листа 6-8 мм, д - анкеры, крепящие облицовку к бетону

Для придания тоннелям повышенной продольной жесткости в случае ожидавшихся неравномерных осадок тоннелей при оттаивании грунта в бетонном слое были предусмотрены арматурные стержни диаметром 28 мм, распределенные по периметру с шагом 20 см. Однако жесткость тоннелей оказалась недостаточной, при их продольном изгибе стыки между тубингами раскрылись, бетон потрескался, а тонкая внутренняя облицовка не могла противостоять напору 80-метрового столба подземных вод и играла лишь роль зонта. Тоннели протекали все недолгое время их жизни, особенно интенсивно в районе прогиба. Очевидно, что подчеканка стыков тубингов при такой конструкции обделки была невозможна, попытки инъектирования тампонажных составов в бетон давали лишь временный локальный эффект. Фильтрующаяся в тоннель вода выносила с собой пылеватые фракции грунта, в результате чего грунтовый массив вместе с тоннелями продолжал оседать, в тоннель все больше выносилось грунта. Наконец, в декабре 1995 года при накопившейся осадке верхнего тоннеля 35 см ситуация окончательно вышла из-под контроля, отрезки тоннеля длиной по 400 метров на участке размыва были запечатаны бетонными перемычками и затоплены как естественным притоком, так и специально поданной водой.

Анализируя итоги аварии, мы рассчитали методом конечных элементов величину нагрузки, развиваемой оседающим массивом грунта на абсолютно жесткий в продольном направлении тоннель при его обтекании. Эта нагрузка оказалась равной 28 МН на пог.м тоннеля - в три раза больше, чем природное давление грунта на глубине 80 м. Такой эффект хорошо известен из решений проф. Г. К. Клейна о давлении грунта на трубу под насыпью [1]. Рассматривая далее 50-метровый отрезок тоннеля как защемленную по концам балку и приложив к нему параболическую эпюру распределенной нагрузки с максимумом в середине равным 28 МН/м, нашли максимальный изгибающий момент в балке, который оказался равным 4100 МНм. Чтобы противостоять такому моменту тоннель наружным диаметром 6 м должен иметь стальную стенку толщиной 1,4 м. Совершенно очевидно, что создать жесткий тоннель, способный сопротивляться смещениям грунта, вызванным теми или иными причинами, просто невозможно.

Самым интересным обстоятельством истории данной аварии [2] является тот факт, что крупный авторитет отечественного тоннелестроения О. Е. Бугаева (в последние годы жизни - доцент ЛИИЖТ), у которой до начала строительства был на экспертном рассмотрении проект этих тоннелей, пришла к аналогичному выводу и указала на непригодность принятой конструкции обделки, буквально предсказав ход будущей аварии, и рекомендовала для участка размыва двойную тубинговую обделку (рис.4), у которой внешнее кольцо тубингов пропускает воду, но воспринимает давление грунта, а внутреннее кольцо воспринимает давление воды и при изгибе тоннеля может подчеканиваться. К сожалению, ее мнение не было принято во внимание.



*Рис.4.Конструкция двойной тубинговой обделки*

Подводя итоги этой аварии можно сделать вывод, что в условиях возможных продольных изгибов тоннеля слой обделки, воспринимающий давление воды (то есть гидроизоляционный слой) должен либо быть способным выдерживать ожидаемые деформации без разрушения, либо быть доступным для эффективного ремонта.

Потерпев две сокрушительные неудачи на размыве, петербургские метростроители были склонны соединить станции “Лесная” и “Площадь Мужества” длинным обходным тоннелем по кембрийским глинам, что потребует не менее 5-6 лет строительных работ и удлинит путь на несколько километров. Между тем опыт ликвидации аварии 1974 года говорит о том, что существует возможность восстановления затопленных тоннелей при по меньшей мере трехкратно более низких затратах времени и средств. На различных геотехнических совещаниях и конференциях автором предлагался один из возможных вариантов восстановления, заключающийся в азотном замораживании стенок тоннеля изнутри с последующей заменой обделки. Идею восстановления тоннелей разделяет ряд ведущих специалистов-геотехников Санкт-Петербурга; моряки-подводники и конверсионные предприятия Петербурга готовы обеспечить выполнение специальных видов работ, связанных с этим вариантом восстановления.

1. Г.К.Клейн. Расчет труб, уложенных в земле. М., Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре., 1957.-196 с.
2. Ю.С.Фролов. Конструктивные решения и расчет обделок перегонных тоннелей метрополитена в условиях размывов. Доклад на III научно-технической конференции по комплексному использованию подземного пространства северо-западного региона “Размывы в коренных породах территории Санкт-Петербурга и строительство в них тоннелей и сооружений”. ВИСИ, СПб.,1996.