

УДК 622.23:553(075)8:550.8

Ф.П. Стрельский, Г.Е. Фельдман

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ ЗОЛОТВАЛА ДЛЯ ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Выполнен комплекс специальных гидрогеологических работ. Результаты этих работ использованы для оценок влияния дренажей на состояние территорий, прилегающих к кварталу, (возможное оседание поверхности в результате снижения уровня подземных вод) и влияния подземных вод на устойчивость бортов котлована и траншей.

Ключевые слова: гражданское строительство, квартал, кембрийская глина, торф озерный, фильтрация.

В 2006 и 2007 годах в Санкт-Петербурге был реализован проект инженерной подготовки для гражданского строительства территории квартала 9А СУН, расположенной на намывном золоотвале ТЭЦ [1]. В соответствии с проектом намывный золошлаковый материал (слой гидрозолы) подлежал удалению при сопутствующем дренаже. Кроме того, из-за высокой токсичности золошлакового материала возникла необходимость в дренировании территории квартала для обеспечения экологической безопасности. Для обоснования проектов этих мероприятий был выполнен комплекс специальных гидрогеологических работ. Результаты этих работ использовались так же и для оценок влияния дренажей на состояние территорий, прилегающих к кварталу, (возможное оседание поверхности в результате снижения уровня подземных вод) и влияния подземных вод на устойчивость бортов котлована и траншей.

Территория квартала 9А СУН имеет форму прямоугольника длиной 760 м и шириной 260 м, вытянутого с севера на юг, и захватывает

северо-восточный угол золоотвала. Поверхность территории квартала имеет абсолютные отметки от 7 до 12 м БС.

Геологический разрез территории квартала до глубины 20 м сложен породами двух типов: естественными осадочными породами — четвертичными морскими и озерно-ледниковыми отложениями, залегающими ниже абс. отметок 5—6 м, и техногенными формированиями на четвертичных отложениях.

Техногенные формирования представлены, в основном, слоем гидрозолы, который распространен по всей территории квартала и имеет мощность от 0,5 до 4,0 м. В северной половине территории квартала слой гидрозолы перекрыт насыпными минеральными грунтами (супесями и песками с обломками строительного мусора и включениями кембрийских глин) мощностью от 0,5 до 5,1 м.

Естественные четвертичные отложения территории квартала представляют следующие породы (сверху вниз):

1. Торф озерный, залегающий непосредственно под гидрозолой. Мощ-

ность торфа изменяется в пределах 2,0 м.

2. Суглинки легкие с прослоями песков и пылеватых супесей, мощностью около 5,2 м.

3. Суглинки тяжелые ленточные, текучепластичные, мощностью до 6,0 м.

4. Суглинки легкие с прослоями песка и с редким гравием, мощностью около 0,6 м.

5. Пески плотного сложения, с прослоями супесей. Мощность слоя более 5,0 м.

Гидрогеологические условия территории квартала определяются наличием двух водоносных горизонтов: безнапорного верхнего, приуроченного к техногенным отложениям, торфу и подстилающим торф легким суглинкам, и напорного — нижнего, связанного с плотными песками, залегающими под относительным водоупором — тяжелыми ленточными суглинками. Уровни подземных вод верхнего водоносного горизонта отмечаются, в основном, на глубинах от 0,5 м у границ квартала до 3,0 м — в центре. В западной части участка, в зависимости от сезонов, уровни колеблются около абс. отметки 9 м. При этом зеркало подземных вод снижается постепенно от западной границы и центра участка к окраинам с уклоном около 0,01. У юго-восточной границы уровень подземных практически выходит на поверхность с абс. отметкой 6,6 м.

В нижнем водоносном горизонте уровень воды до начала производства работ по инженерной подготовке территории квартала располагался примерно на 1,5 м ниже, чем в безнапорном, практически не зависел от него и на изменения интенсивности атмосферных осадков реагировал с большим опозданием. Питание обоих водоносных горизонтов осуществляется преимущественно за счет атмо-

сферных осадков с интенсивностью до 2 мм в сутки. Суточный максимум осадков может достигать 76 мм.

Коэффициенты фильтрации для пород безнапорного водоносного горизонта при изысканиях определены следующими величинами: для насыпных грунтов — от 1 до 3 м/сут, для гидрозолы — от 0,5 до 1 м/сут, для супесей и суглинков — до 0,05 м/сут. При этом коэффициенты водоотдачи пород и проницаемость песков напорного горизонта не оценивались.

При фильтрации атмосферных осадков через слой золошлаковых накоплений неизбежно происходит миграция токсичных веществ из золоотвала в подстилающие слои и загрязнение гидравлически связанных с ними подземных вод. Для предотвращения поступления подземных вод из соседнего участка, так же представленного участком золоотвала, территория квартала по западной и южной границам была ограждена глиноцементной противофильтрационной завесой, заглубленной в суглинки, подстилающие золошлаковый слой.

При удалении золошлакового слоя постепенно создавался котлован вытянутой формы, конечная площадь которого составляет 200×700 м². Между глиноцементной завесой и бортом котлована оставляется охранная призма шириной 15 м.

В соответствии с положением слоя гидрозолы горизонтальное дно котлована располагается на абс. отметке 4,0 м. Поверхность рекультивированной территории в пределах котлована располагается на абс. отметке 7,0 м.

Технология удаления золошлакового слоя предусматривала осуществление сопутствующего дренажа (осушение удаляемой части слоя) параллельными дренажными канавами. Для

гидрогеологического обоснования проекта сопутствующего дренажа и оперативного управления дренажем был предусмотрен комплекс специальных гидрогеологических работ, включающий:

а) мониторинг режима фильтрации подземных вод на территории квартала в период рекультивации;

б) уточнение фильтрационных параметров пород безнапорного водоносного горизонта, непосредственно влияющего на условия рекультивации территории квартала;

в) численное моделирование фильтрации подземных вод на территории квартала для оперативного прогноза ожидаемых водопритоков в котлован и к средствам дренажа.

В качестве основного средства мониторинга режима фильтрации подземных вод использовались наблюдательные скважины, оборудованные дистанционными тензодатчиками — индикаторами порового давления воды в наблюдаемых обводненных слоях. Всего на территории квартала пробурены и оборудованы датчиками 5 наблюдательных скважин глубиной от 10 до 19 м. Из них 4 скважины оборудованы вдоль западной границы квартала, в 3 м от цементноглиняной противофильтрационной завесы и в 12 м от западного борта котлована, и одна в центре северной части рекультивируемой территории. В каждой наблюдательной скважине были установлены от 2 до 3 датчиков порового давления, контролировавших давление воды в золошлаковом слое и в подстилающем его слое суглинков. Одновременно наблюдались и изменения давления воды в напорном слое пылеватых песков, залегающем под тяжелыми водоупорными ленточными суглинками, на глубине более 14 м.

Результаты мониторинга режима подземных вод позволили:

а) постоянно получать оперативную информацию о фактических уровнях (напорах) подземных вод на территории квартала и в бортах котлована;

б) учитывать влияние напоров подземных вод на устойчивость бортов котлована и дренажных канав;

в) уточнить (с использованием численного моделирования) фильтрационные параметры золошлакового слоя и подстилающих суглинков по фактическим напорам и водопритокам в котлован;

г) давать оперативные прогнозы водопритоков к отдельным участкам котлована и к средствам дренажа.

По результатам мониторинга режима подземных вод установлено, что:

- в процессе инженерной подготовки территории уровни в верхнем (безнапорном) горизонте на западной границе квартала не опускались ниже абс. отметки 7,0 м., при этом в слое гидрозолы уровни воды были ниже, чем в подстилающих суглинках, что свидетельствует о наличии слабой обходной фильтрации в котлован под противофильтрационной завесой по слою суглинков;

- в песках напорного горизонта под слоем тяжелых суглинков напор воды в естественном состоянии был на 1,0—1,5 м ниже напоров грунтовых вод в техногенных формированиях, но выше почвы слоя гидрозолы; это свидетельствует о наличии восходящей фильтрации из напорного горизонта к поверхности, осложняющей осушение слоя гидрозолы и вызывавшей заболачивание территории квартала перед образованием здесь золоотвала;

- в течение большей части периода инженерной подготовки территории квартала уровни воды в слое песков на-

порного горизонта плавно изменялись между абс. отметками 7,0 и 8,0 м, независимо от развития котлована; но перед завершением рекультивации напор в песках снизился только до абс. отметки 6,5 м, а после завершения — снова поднялся до абс. отметки поверхности рекультивации 7,0 м, следовательно, тяжелые суглинки над песками слабо, но проницаемы и при этом неизбежна слабая восходящая фильтрация из напорного горизонта к рекультивированной поверхности с возможным постепенным увеличением напора

Восходящая фильтрация подземных вод на рекультивированной территории квартала является определяющей особенностью экологических условий квартала. В результате этой особенности в период рекультивации территории квартала подземные воды вблизи котлована фильтруются в котлован. При этом фильтрация из котлована на окружающие территории полностью исключается. Из этого следует, что в период рекультивации территория квартала не может являться источником загрязнения, а, наоборот, сама является объектом обводнения и возможного загрязнения со стороны прилегающих территорий.

Исходя из результатов мониторинга и лабораторных испытаний пород, определены коэффициенты фильтрации отложений золоотвала, установлена тенденция уменьшения проницаемости материала отвала с возрастанием степени его уплотнения. По физическим показателям (плотности, влажности и пористости) гидрозоль в северной части территории квартала была больше нагружена и уплотнена, чем в южной. Средний коэффициент фильтрации на севере составляет около 0,1 м/сут. В южной части территории квартала гидрозоль неоднородна по водопроницаемости и может быть разделена на верх-

ний слой с проницаемостью около 0,5 м/сут и нижний — с проницаемостью около 0,06 м/сут. Эти значения коэффициентов фильтрации соответствуют условиям дренирования слоя золошлаков при градиентах напора более 0,1, т.е. они обладают начальным градиентом фильтрации, равным примерно 0,1.

Наличие в золоотвале начального градиента фильтрации свидетельствует о том, что значительная часть поровой воды здесь физически связана со скелетом и переходит в состояние свободной (гравитационной) воды по мере роста гидродинамического давления на воду при увеличении градиента напора. Большое содержание физически связанной воды в гидрозоль определяет ее высокую молекулярную влагоемкость и низкую водоотдачу. Так как физически связанная вода не может быть выделена из гидрозоли посредством свободного стекания.

По результатам лабораторных исследований в рамках специальных гидрогеологических работ в северной части территории квартала, где золоотвал был пригружен насыпным грунтом, гидрозоль имеет средние пористость и влажность, соответственно 51 и 54 %. При этом 43 % влажности связаны с минеральным скелетом и только 11 % — свободны. Здесь свободная вода составляет только пятую часть поровой воды в гидрозоль. В южной части территории слой гидрозоли не был нагружен и имел более высокие пористость и влажность, равные 65 %, в том числе связанной воды по влажности 46 % и свободной — 19 %. Следовательно, на юге свободная вода составляет менее трети поровой воды в гидрозоль. Таким образом, коэффициент гравитационной водоотдачи для слоя гидрозоли в северной части квартала составил 0,10, а в южной — 0,19.

По результатам мониторинга режима фильтрации в составе специальных гидрогеологических работ уточнены так же фильтрационные параметры насыпного грунта и подстилающих гидрозолу легких суглинков. Водопроницаемость насыпных грунтов оценена равной 2,0 м/сут, а гравитационная водоотдача — в пределах 0,1. Для подстилающих гидрозолу легких суглинков водопроницаемость равна 0,01 м/сут, а гравитационная водоотдача — около 0,2.

Из приведенных результатов выполненных на территории квартала специальных гидрогеологических работ следует, что уточненные величины проницаемости всех слоев, затрагиваемых рекультивацией, существенно сократились. Но в большей мере сокращение проницаемости проявилось в золошлаковых отложениях (в гидрозолу), где к тому же обнаружился еще и начальный градиент фильтрации.

В исходном проекте рекультивации территории квартала выемку гидрозолы планировалось производить при ее сопутствующем дренировании параллельными канавами. Для выбора наиболее эффективного расстояния между дренажными канавами было выполнено численное моделирование процесса осушения слоя гидрозолы при нескольких вариантах расположения канав. При этом использовались характеристики проницаемости пород, полученные при изысканиях, существенно более высокие, чем полученные в дальнейшем по результатам специальных гидрогеологических работ, и не учитывался начальный градиент фильтрации в гидрозолу.

В результате выполненного моделирования получены:

а) распределения остаточных напоров (столбов воды) в осушаемом золошлаковом слое между параллельными дренажными канавами для не-

скольких вариантов расстояний между ними (ширины осушаемой полосы);

б) водопритоки из осушаемых полос слоя в дренажные канавы.

Из полученного моделированием прогноза следовало, что даже при завышенной проницаемости гидрозолы, равной 0,5 м/сут, реальной пористости 60 %, исходной обводненной мощности слоя, равной 4 м, и минимальном расстоянии между дренажными канавами 20 м остаточный столб воды в центре осушаемой полосы снижается до 1,0 м только за 4 месяца и далее снижаться не будет. Причиной тому являются атмосферные осадки и восходящий поток подземных вод из подстилающих гидрозолу суглинков, так как после снижения водопритока в дренажные канавы до суммы расходов атмосферных осадков и восходящего перетекания снижение уровня воды в дренируемой полосе прекращается.

Поскольку фактическая водопроницаемость гидрозолы оказалась ниже использованной при прогнозе и зависимой от градиента напоров, реальная скорость дренирования гидрозолы была значительно ниже прогнозной. К тому же при экскавации гидрозолы от 80 % поровой воды в северной части квартала до 60 % — в южной оставались в гидрозолу и вместе с ней вывозились за пределы рекультивируемой территории. Оба эти фактора привели к отказу от использования сопутствующего дренирования золошлаковых отложений параллельными дренажными канавами.

Результаты специальных гидрогеологических работ показали, что при прогнозировании эффективности осушительных мероприятий в слое гидрозолы необходимо учитывать градиенты напоров и использовать коэффициенты фильтрации, соответствующие ожидаемым градиентам напоров.

В связи с тем, что поверхность территории квартала 9А СУН после рекультивации располагается на абс. отм. 7 м, а уровни подземных вод за западной и северной границами квартала (соответственно, со стороны Межквартального проезда и ул. Коллонтай, рис. 1) во все сезоны находятся около абс. отм 9 м, территория квартала превращается в область стока подземных вод и при отсутствии дренажа должна заболачиваться. При этом, не смотря на ограждение рекультивируемого массива квартала противофильтрационной завесой по западной и южной границам, не исключалась возможность проникновения сюда загрязненной воды из частей золотоотвала, оставшихся в защитной призме и за пределами квартала.

По этим причинам, в соответствии с проектом рекультивации территории квартала, ее экологическая защита обеспечивалась устройством двух независимых (гидравлически не связанных) дренажных систем: юго-западной и северо-восточной, каждая длиной около 840 м (рис. 1). В каждой дренажной системе, ниже абс. отм. 4,7 м, в сопряжении дна котлована с откосами защитных грунтовых призм, в слое суглинков, предусматривалась проходка дренажной канавы с дном на абс. отметке 3,2 м. На высоте 0,2 м над дном канавы на кирпичный бой укладывалась дренажная труба диаметром 0,16 м и засыпалась кирпичным боем до абс. отметки 3,70 м. По трассам обеих дренажных систем планировалось оборудование колодцев для сбора и отвода воды.

Во избежание попадания в рекультивированную часть квартала загрязнённых вод из слоя гидрозолы на южный и западный борта котлована (откосы защитных грунтовых призм) укладывается глиняное по-

крытие «BENTOMAT». Дно котлована покрывается слоем глины толщиной 0,05—0,10 м с коэффициентом фильтрации около 0,0001 м/сут. На дне котлована, на абс. отметке 3,7 м, под слоем глины укладывается слой песка толщиной 0,3 м. Над слоем глины, до абс. отметок 4,6—4,7 м, укладывается слой песка толщиной 0,5—0,6 м. Глиняное покрытие «BENTOMAT» герметично сочленяется со слоем глины на дне котлована и пригружается на всем откосе слоем песка толщиной 0,3 м.

В северо-восточную дренажную систему для сравнительно чистых вод, располагающуюся вдоль улиц Коллонтай и Бельшева (рис. 1), должен быть открыт сток атмосферных осадков, выпадающих на рекультивированную часть квартала. Поэтому северный и восточный борта котлована не гидроизолируются, но так же пригружаются слоем песка мощностью 0,3 м. Так как городские дренажные устройства под улицами Коллонтай и Бельшева расположены на несколько метров выше северо-восточной дренажной системы квартала, воды, собирающиеся в городские дренажи под этими улицами, частично могут фильтроваться в параллельную им северо-восточную дренажную систему квартала и дополнительно обводнять ее. Выше абс. отметок 4,6—4,7 м котлован заполняется обратной засыпкой (насыпным грунтом) до абс. отметки около 7,0 м.

Для обоснования проекта юго-западной и северо-восточной систем дренажа для экологической защиты территории квартала выполнялся прогноз водопритоков к каждой системе на численной модели фильтрации подземных вод. При этом использовались фильтрационные параметры пород и напоры, уточненные специальными гидрогеологическими работами. Структура модели в поперечном разрезе показана на рис. 2.

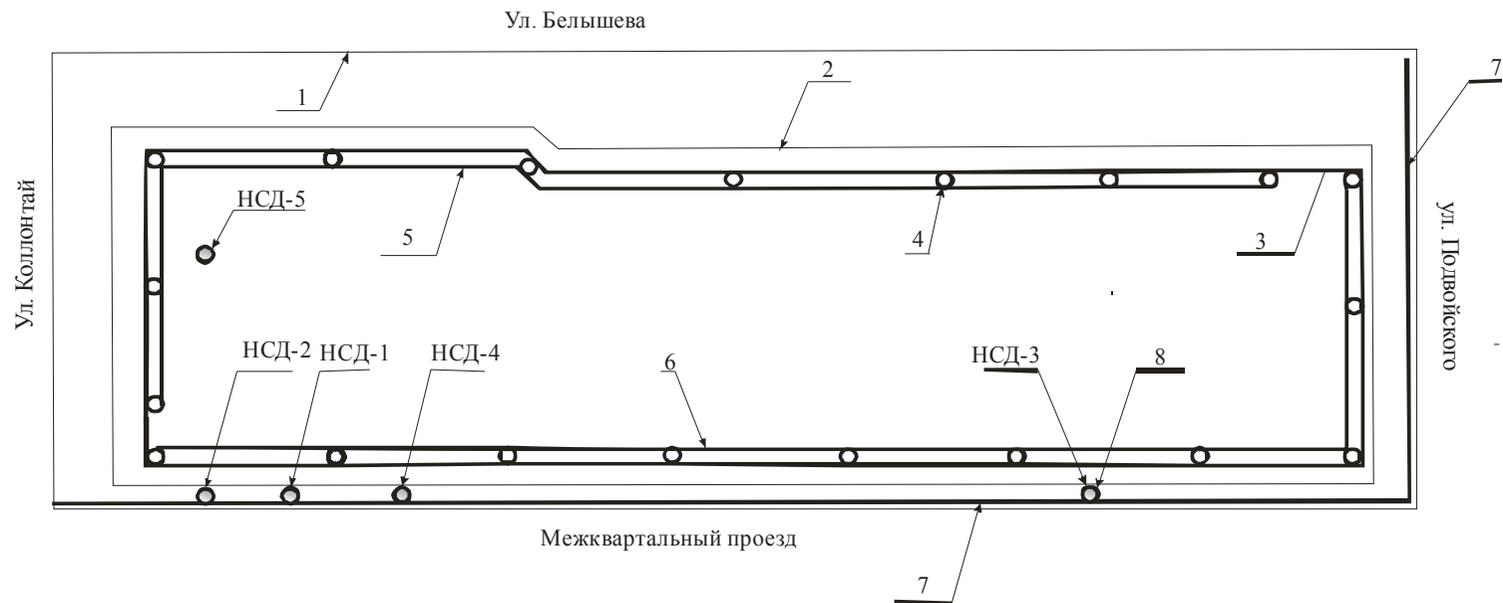


Рис. 1. Схема расположения дренажных систем рекультивированной части квартала 9А СУН6:

1 — красная линия квартала; 2 — верхняя граница борта котлована; 3 — граница дна котлована; 4 — водосборный колодец; 5 — северо-восточная система дренажа; 6 — юго-западная система дренажа; 7 — противофильтрационная завеса (ПФЗ); 8 — наблюдательная скважина

Прогноз работы дренажных систем, т.е. прогноз ожидаемых водопритоков к ним и гидродинамической сетки фильтрации, выполнен для сезонов с положительными температурами воздуха при атмосферных осадках, равных в среднем 1,5 и 3,0 мм/сут, при условии практически свободного движения воды по коллекторам между водосборными колодцами. Результаты прогноза приведены в табл.

Из таблицы следует, что водопристок в юго-западную дренажную систему при атмосферных осадках до 3 мм/сут. не возрастает и остается таким же, как и при атмосферных осадках до 1,5 мм/сут. Такое положение объясняется тем, что юго-западная дренажная система изолирована от рекультивированной части массива в котловане и защищена от попадания поверхностных вод. При этом напоры подземных вод при заданных на модели изменениях интенсивности осадков практически не изменяются.

Водопристок к северо-восточной дренажной системе при увеличении интенсивности атмосферных осадков до 3 мм/сутки возрастает с 38 до 45 м³/сут на 100 м длины дренажной системы или с 340 до 400 м³/сут по всей дренажной системе.

Как видно из результатов моделирования, водопристок к северо-восточной дренажной системе при-

мерно в 3 раза выше, чем к юго-западной, при любом количестве атмосферных осадков. В соответствии с гидродинамической сеткой фильтрации это объясняется тем, что кроме подземных вод, в северо-восточную дренажную систему перетекают:

а) большая часть атмосферных осадков, выпадающих на рекультивированной территории квартала,

б) вода из дренажей под улицами Коллонтай и Бельшева, расположенных на несколько метров выше.

Кроме того, численное моделирование показало, что при атмосферных осадках 1,5 мм/сут и выше западная половина рекультивированной территории, вытянутая вдоль межквартального проезда, может заболачиваться, так как 40 % атмосферных осадков будут оставаться на поверхности, не имея возможности пропитываться в нижележащие слои. Путь осадкам в нижележащие слои и к юго-западной дренажной системе перекрыт гидроизолирующим глинистым слоем, а движение к северо-восточной дренажной системе затруднено низкой (1 м/сут.) водопроницаемостью песчаной подсыпки над гидроизолирующим слоем. Следовательно, в проекте дренажа необходимо предусмотреть дополнительные дренажные мероприятия на западной части поверхности территории квартала.

Результаты прогноза водопритоков к системам дренажа рекультивируемой части квартала 9А СУН

Участки водопритоков	Водопритоки к системам дренажа в м ³ /сут.			
	Юго-западная система		Северо-восточная система	
	осадки, мм		осадки, мм	
	1,5	3,0	1,5	3,0
Участок системы дренажа длиной 100 м	13	13	38	45
Вся дренажная система	120	120	340	400

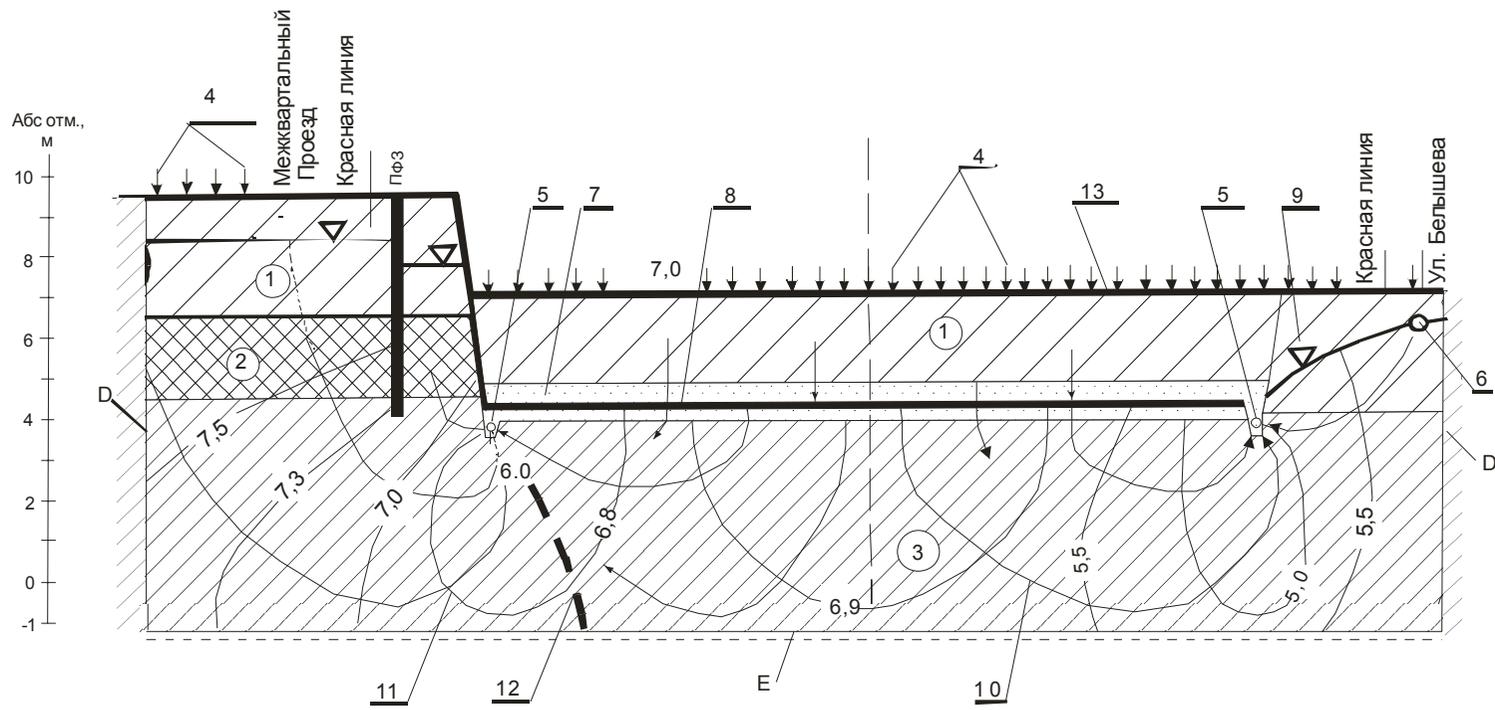


Рис. 2. Структура численной модели фильтрации к системам дренажа рекультивируемой части квартала 9А СУН в поперечном разрезе:

1 — насыпной грунт (ИГЭ-1); 2 — гидрозоль (ИГ-2); 3 — суглинок легкий (ИГЭ-3); 4 — атмосферные осадки; 5 — дренаж котлована; 6 — городской дренаж; 7 — песок; 8 — слой глины; 9 — поверхность грунтовых вод; 10 — линия тока; 11 — линия равных напоров, м; 12 — граница раздела относительно грязных и чистых подземных вод

Из анализа гидродинамической сетки фильтрации, полученной численным моделированием (рис. 2), следует, что противofильтрационная цементноглиняная завеса препятствует прямому поступлению на рекультивированную территорию загрязненных подземных вод из части золоотвала, расположенной за пределами квартала. Притоки загрязненных вод из гидрозоли, оставленной в защитной призме, и из периферийной части золоотвала в обход под противofильтрационной завесой, полностью перехватываются юго-западной дренажной системой. При этом сюда же втягиваются и часть воды, слабо фильтрующейся из рекультивируемого массива вниз через гидроизолирующий глиняный слой, уложенный по дну котлована, и слабый восходящий поток.

Из изложенного выше следует, что:

1. Проекты дренажей любого назначения для обеспечения инженерной подготовки (рекультивации) территории золоотвала при гражданском строительстве должны основываться на прогнозе условий фильтрации к дренажным устройствам с учетом специфических водно-физических и фильтрационных свойств золошлаковых накоплений, гидрогеологических условий, атмосферных осадков и влияния ближайших городских дре-

нажей, как возможных дополнительных источников обводнения рекультивируемой территории.

2. Гидрогеологические условия дренируемой территории, в том числе фильтрационные характеристики золошлаковых накоплений и естественных пород, могут быть существенно уточнены по результатам специальных гидрогеологических работ, в том числе мониторинга режима напоров подземных вод посредством наблюдательных скважин, оборудованных датчиками порового давления в контролируемых слоях.

3. Определяющими характеристиками золошлаковых отложений при оценке условий дренирования золоотвалов являются водопроницаемость, максимальная молекулярная влагоемкость и начальный градиент фильтрации.

4. Для обоснования проектов дренажа целесообразно использовать численное моделирование фильтрации подземных вод, которое позволяет оперативно получать не только ожидаемое распределение (прогноз) водопритокков к элементам дренажа, но и гидродинамическую сетку фильтрации (линии тока и линии равных напоров), отражающую границы между потоками, фильтрующимися из загрязненных и из относительно чистых источников. **ТАБ**

— Коротко об авторах —

Стрельский Ф.П. — кандидат геолого-минералогических наук, НПФ «Карбон», Санкт-Петербург;
Фельдман Г.Е. — инженер ООО «Авант», Санкт-Петербург.

