

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОТКОСОВ ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ С УЧЕТОМ ДЛИТЕЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ СТОКА ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

С.В. Сольский¹, Д.П. Самофалов², А.Н. Арефьева³, Е.В. Булганин⁴

В настоящее время в промышленном и гражданском строительстве значительно увеличилось количество строящихся сооружений с большой глубиной заложения фундаментов или многоэтажной подземной частью. В практике проектирования глубоких строительных котлованов обоснование параметров и конструкций откосов основывается на расчетах устойчивости бортов и дна котлована, выполняемых в соответствии с действующими нормативными требованиями. В основу расчетов устойчивости положены методы предельных состояний. При соответствующем обосновании могут быть использованы проверенные практикой упрощенные методы расчета. Фильтрационными расчетами определяется положение поверхности депрессии, градиенты напора в местах разгрузки фильтрационного потока на откос и дно котлована, оценивается возможность развития суффозионных процессов. После организации строительного водопонижения необходимо проводить ежедневные наблюдения за состоянием дна и откосов открытого котлована для своевременного принятия мер, исключающих оплывание откосов, суффозию грунта, выпор основания и др. проявлений, ведущих к нарушению устойчивости откосов и дна котлована, а также оснований расположенных рядом сооружений [1 – 4].

Как показывает практика, необходимость совершенствования методов расчетов обоснования устойчивости котлованов до сих пор является актуальной проблемой. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации объектов приводит к появлению новых и развитию уже апробированных методов [5, 6].

Зачастую строительные котлованы откосного типа сохраняются в течение продолжительного времени, в связи с чем необходимость их сохранения растягивается на несколько лет, что значительно превышает проектные сроки. На откосы таких котлованов воздействуют климатические фак-

¹ Доктор техн. наук
Тел. (812) 493-93-47, E-mail:solskiysv@vniig.ru

² Канд. техн. наук
Тел. (812) 493-93-47

³ Инженер
Тел. (812) 493-93-49, E-mail:arefievaan@vniig.ru
ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21

⁴ Инженер
Тел. (812) 458-56-62, E-mail:EBulganin@proektvodstroj.ru
ООО «НПК Проектводстрой», 195220, Санкт-Петербург, пр. Непокоренных, 47А

торы: циклическое переувлажнение, просыхание, промерзание, оттаивание, ветровая эрозия. На поверхности откосов за счет атмосферных осадков формируется поверхностный ручейковый сток, который в определенных условиях приводит к водной эрозии откосов. Эрозия откосов, оплывы и оползни в результате воздействия атмосферных процессов с учетом большой глубины котлованов (до 15 – 25 м) и больших площадей откосов (20000 – 50000 м²) приводят к серьезным негативным последствиям (изменение очертания откосов, развитие различных видов фильтрационных деформаций, перемещение значительных масс грунта к подошве откоса и т.д.).

Учитывая важность указанной проблемы, необходима разработка рекомендаций по комплексу мероприятий, обеспечивающих надежную защиту откосов глубоких котлованов в условиях длительного воздействия перечисленных неблагоприятных факторов. В ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» в лаборатории Фильтрационных исследований им. акад. Н.Н. Павловского в настоящее время выполняются комплексные исследования по этой тематике, включающие следующие виды работ:

полевые обследования ряда построенных и строящихся котлованов с целью определения причин и характера разрушения откосов в результате водной эрозии;

лабораторные исследования, направленные на разработку методики экспериментального определения эрозионной устойчивости грунтов откосов, и проверка на лабораторных моделях различных вариантов мероприятий по повышению устойчивости откосов;

теоретические работы, направленные на обоснование мероприятий по повышению устойчивости, а так же выделение критериев эрозионной устойчивости откосов.

К настоящему времени выполнен достаточно большой объем исследований по всем вышеуказанным направлениям. В представленной публикации освещены результаты, полученные на основании полевых обследований. Оценка откосов котлованов с целью выяснения причин их неудовлетворительного состояния проводилась на строящихся Ленинградской и Балтийской АЭС, а так же на участках малоэтажной застройки в пригородах Санкт-Петербурга.

Результаты лабораторных исследований, а так же теоретические обоснования рекомендаций по разработке комплекса мероприятий, обеспечивающих противоэрозионную и противооползневую устойчивость откосов глубоких котлованов на период возведения в них подземной части сооружений, будут приведены в следующих публикациях.

В результате обследований, в первую очередь, отмечается наличие на откосах следов водной эрозионной деятельности. Разрушение откосов под действием водной эрозии происходит в результате стока по нему поверхностных вод, образованных на территории выше откоса и поступающих в котлован через бровку откоса, а так же в результате воздействия ручейкового стока, образованного в процессе выпадения атмосферных осадков непосредственно на откос.

Опыт показывает, что при геологических изысканиях, даже очень подробных, выделить тонкие прослойки и линзы песков и учесть их при оценке устойчивости откоса технически весьма сложно. Обычно в геологических отчетах при наличии прослоек и линз применяют понятие *спора-*

дическое распространение. Отсутствие подробной информации о прослойках и характере их обводнения создает особенно много проблем именно при строительстве откосных котлованов. Выход подземных вод на откос приводит к размыву откоса ниже прослойки, выносу песка, обрушению и оплыванию части откоса, расположенного выше обводненной прослойки.

Особенности влияния на откосы котлована сосредоточенного стока поверхностных вод с прилегающей территории

Эрозия выражается в виде продольных борозд разной глубины и с разным расстоянием между ними. Глубина и ширина эрозионного русла зависит от расходов и продолжительности стока, а так же от геотехнических свойств грунта. При этом поступающий с бровки ручейковый сток может привести к развитию весьма значительной эрозии в грунтах различного механического состава. Иногда размывы имели значительные габариты, и ширина рытвин достигала нескольких метров, глубина доходила до 1м, а вынос грунта с откоса с одной рытвины был 20 – 30 м³.

Эрозия, образуемая за счет притока воды извне котлована, представлена бороздами, формирующимися в месте пересечения сосредоточенных ручьев и бровки откоса. Эрозионный процесс развивается сверху вниз, то есть наибольшей глубины и ширины врез достигает на вершине. Процесс идет в противоположном по сравнению с процессом естественного образования оврагов направлении, наступление которых происходит снизу вверх. На откосе размывается прежде всего участок, примыкающий к линии перегиба уклонов.

Рис. 1 иллюстрирует действие на откос, сложенный плотными слабо-водопроницаемыми супесями, ручейкового сосредоточенного стока, собирающего воду в тальвеге с достаточно большой территории (порядка 1 – 1,5 га). На рисунке видны борозды от стока микроручейков с территории, прилегающей к откосу. При этом может наблюдаться значительное разрушение откоса с образованием конуса выноса грунта к его подножью.

Как показали обследования, в настоящее время не уделяется должного внимания мероприятиям, направленным на недопущение поступления поверхностных вод на откос с вышележащих площадей. За счет этого фактора, в той или иной степени, эрозия откосов наблюдается повсеместно.

В настоящее время в практике проектирования для отвода поверхностных вод с прилегающих территорий от котлована устраивается ловчая канава в грунте вдоль борта котлована. Однако такая конструкция организации водоотвода снижает устойчивость бортов котлована из-за того что грунт напитывается водой, собранной в ловчей канаве.

Противоэрозионную защиту глубоких откосных котлованов от водной эрозии, вызванной поступлением на откос поверхностной воды с окружающей территории, предлагается осуществлять за счет создания ограждающей водоотводной сети.

Нами предложена новая схема, при которой вода будет сразу отводиться с прилегающих к котловану территорий. Для этого по периметру котлована на расстоянии 5,0 – 7,0 м от бровок откосов следует устроить коллекторно-лотковую сеть. Схема предложенной коллекторно-лотковой сети представлена на рис. 2.



Рис. 1. Вид на эрозионное русло с конусом выноса на подошве откоса котлована (Ленинградская АЭС-2)

Лоток устраивается по тальвегу искусственной пологой ложбины с коэффициентом заложения откосов от 5 до 10. Для устройства такой сети вокруг котлована за счет планировки устраивается ложбина. При этом, бровка откоса ложбины, обращенная к откосу котлована, сопрягается с бровкой котлована. Под лотковой сетью, на глубине 1,2 – 2,0 м укладываются трубчатый дренажный коллектор, на котором через 50 м оборудуются смотровые колодцы из железобетонных колец.

Колодцы играют двойную роль, являясь смотровыми и поглотительными. Верхние кольца колодцев следует перфорировать и обсыпать щебнем на глубину до 1,0 м. Это позволяет поглощать сток из подведенных к нему лотков. Так как в колодец может поступать вода с взвешенными частицами грунта, необходимо предусмотреть устройство отстойников, глубиной не менее 0,5 м.

Преимущество предложенной коллекторно-лотковой сети в том, что за счет перевода поверхностного стока в коллектор, появилась возможность устроить открытую лотковую сеть малого заглубления по всему периметру котлована, при этом территория, примыкающая к бровке откоса котлована, дополнительно осушается за счет дренажного коллектора. Кроме того, устройство переездов техники поверх неглубокой системы лотков не является сложным и дорогим. Такая система самотечна, надежна, компактна и не требует существенных затрат на эксплуатацию.

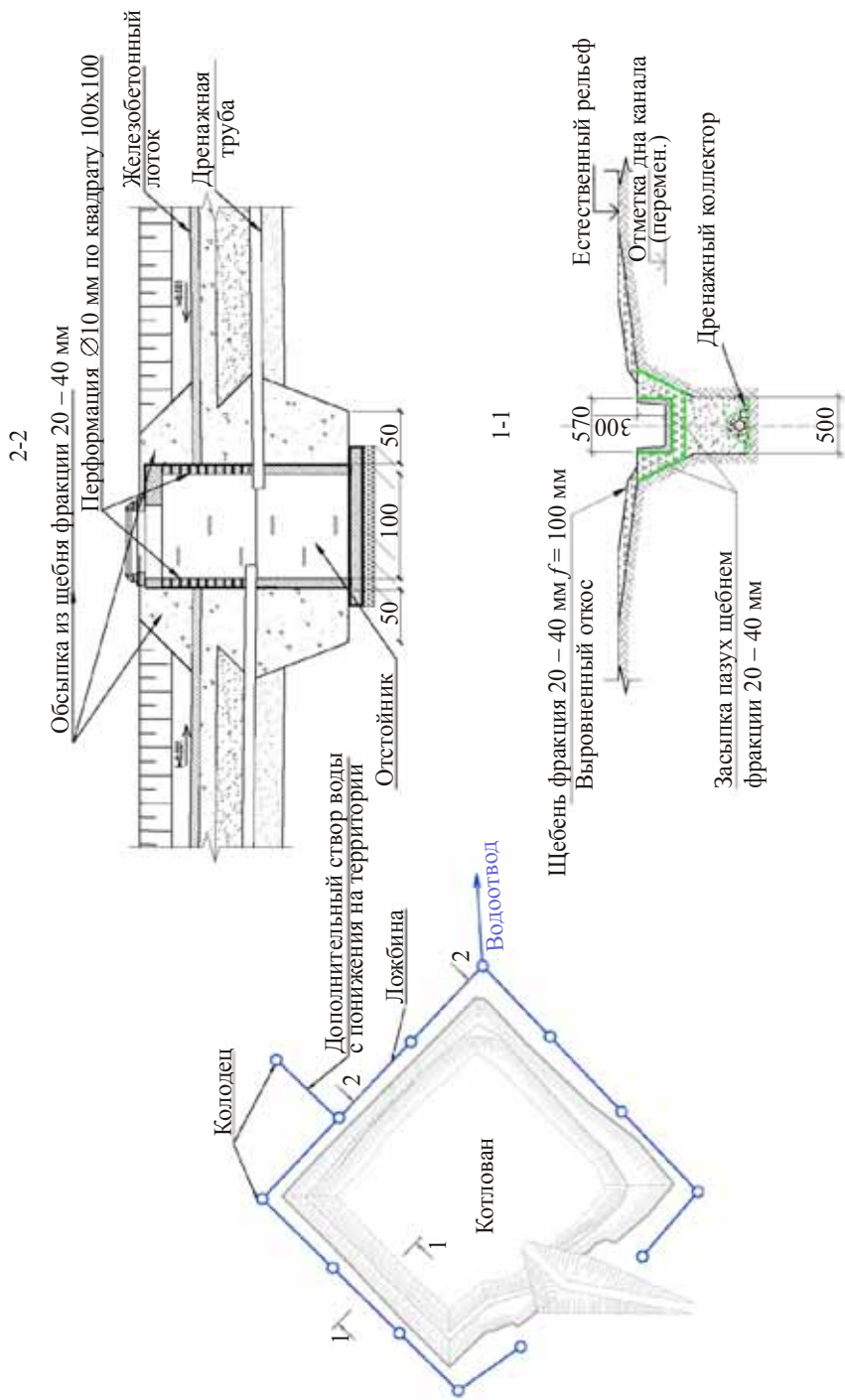


Рис. 2. Коллекторно-лотковая сеть по периметру котлована

Особенности влияния на откосы котлована рассредоточенного стока атмосферных осадков, выпадающих на его поверхность

На участках откоса, где нет притока воды через бровку, наблюдается только эрозия от стока, образованного за счет осадков, выпадающих непосредственно на откос.

Как показали обследования, такого рода эрозия в хорошо фильтрующих грунтах не наблюдается либо она незначительна и ее последствия не создают особых проблем. Такого рода водная эрозия откосов наблюдается на слабоводопроницаемых грунтах, инфильтрация воды на поверхности которых ниже интенсивности выпадения осадков. Чем больше высота откосов, тем значительнее их эрозия за счет выпадения осадков. На основе наблюдений установлено, что борозды, образованные от выпавших непосредственно на откос осадков, как правило, равномерно покрывают откос, расстояние между ними колеблется от 1,5 до 2,5 м.

На откосах высотой до 2,0 – 2,5 м эрозия за счет стока выпадающих на них осадков незначительна, но за счет ручейкового стока с бровки может быть достаточной, чтобы привести к образованию эрозионных врезов с выносом большого количества грунта к основанию. При интенсивном стоке эрозионный процесс может привести к обрушению откоса. На откосах более 3,0 – 4,0 м эрозия в виде борозд за счет стока от выпадения осадков прослеживается, как правило, на 1,0 – 2,0 м ниже бровки откоса. Отмечено, что струйный и ручейковый стоки образуют борозды даже на слабоводопроницаемых грунтах ниже бровки как минимум на 1,0 м, истоки борозд располагаются на 1,0 – 1,5 м ниже гребня откоса. Объясняется это тем, что для образования ручейкового потока с параметрами, достаточными для размыва грунта, необходима определенная площадь водосбора – хотя бы 2 – 3 м².

В результате воздействия потока происходит изменение структуры грунта (сегрегация) с выносом самых мелких, пылеватых частиц, образующих у основания откоса конус выноса. Грунт, смытый с откоса в результате эрозии, скапливается на подошве откосов. Грунт в виде конуса выноса, принесенный потоками, постоянно увлажняется в результате выпадения даже незначительных осадков. Под ним формируется зона переувлажненного основания. Конус выноса, состоящий в основном из вымытых потоком мелких частиц грунта, представляет собой слабоводопроницаемую преграду для потока грунтовых вод, что приводит к образованию барражного эффекта. Переувлажнение откоса у его основания снижает прочностные характеристики грунта, что может спровоцировать оплывание или оползание откоса.

Анализ литературных источников привел к заключению, что в настоящее время нет аналитических способов расчета водной эрозии откосов котлована, вызванной атмосферными осадками, а так же нет эмпирических методик по такому расчету. Для разработки методики расчетной оценки водно-эрозионного процесса от воздействия на откос атмосферных осадков был выполнен комплекс лабораторных и аналитических исследований, результаты которых планируется рассмотреть в следующих статьях.

Особенности влияния на откосы стока подземных вод

Полевые обследования состояния откосов глубоких котлованов позволили выявить, что при устройстве котлованов одной из серьезных проблем, приводящих к увеличению сроков строительства и удорожанию работ, является потеря устойчивости откосов в результате выхода на откос подземных вод из песчаных прослоек. Прослойки зачастую имеют незначительную мощность, что затрудняет их обнаружение при проведении инженерно-геологических изысканий. Так как прослойки не зафиксированы на геологических разрезах, в проектах не предусмотрен учет их влияния на устойчивость откосов и не разрабатываются мероприятия по предотвращению разрушения откосов в местах выхода прослоек. Неучет в проекте влияния прослоек на устойчивость откосов приводит к неожиданному для строителей суффозионному выносу грунта прослойки в котлован, развитию процесса оплыва откосов, обрушению и вывалу значительных по площади грунтовых масс и, в конечном счете, замыву котлована.

На первой очереди сооружений Балтийской АЭС разрушение откоса котлована произошло в связи с выносом грунта из обводненной прослойки среднезернистого песка. Суффозионный вынос привел к образованию подземных полостей в прослойке. В полость стал проседать грунт из вышележащих необводненных слоев. Это привело к нарушению устойчивости склонов котлована и выносу из откоса значительного объема грунта.

Со схожей ситуацией столкнулись строители Ленинградской АЭС-2 при разработке котлована под одно из зданий [7]. Котлован устраивался на территории эрозионного вреза, образованного в результате размыва нижнекембрийских отложений в дочетвертичный период. Эрозионный врез заполнен четвертичными отложениями, состоящими из слоев различного гранулометрического состава и плотности. После того как котлованом были каптированы песчаные прослойки, в него началась разгрузка подземных вод из этих прослоек. В слоях песка появились достаточно высокие градиенты напора (>10), за счет которых возросли скорости движения воды. В условиях большой разнородности песков (от мелких пылеватых до гравелистых) при возрастании скоростей водного потока начался процесс суффозионного выноса мелкой фракции в котлован. Суффозионный вынос привел к образованию полостей на глубине 6 – 10 м, в полости стал проседать грунт из вышележащих необводненных слоев. Это привело к нарушению устойчивости склонов котлована, вывалу значительных объемов грунта из откосов на глубине 5 – 10 м (обвалы высотой 1,0 – 3,0 м на протяжении всего подножья откоса котлована). На подошве откосов образовались конусы выноса из мелких фракций, достигающие значительных размеров, при расположении вдоль всего подножья откоса котлована ширина их достигала 15 – 20 м.

В процессе производства строительных работ как на Балтийской АЭС, так и на Ленинградской АЭС-2 решить задачу по обеспечению достаточной устойчивости откосов в сложившейся ситуации оказалось весьма сложно.

Основываясь на накопленном опыте, можно сделать вывод, что при проектировании откосов глубоких котлованов необходимо дополнительно к обоснованию устойчивости на основе методов предельного состояния

обосновать и разработать мероприятия, обеспечивающие противооползневую и противозерозионную устойчивость откосов в районе выхода песчаных обводненных прослоек.

При наличии таких прослоек в теле массива грунта, в котором устраивается откос, для обеспечения устойчивости откоса, необходимо выполнение дополнительных мероприятий. Для таких инженерно-геологических условий рекомендуем два варианта.

В *первом варианте* мероприятия сводятся к мерам по осушению прослойки выше места ее вскрытия котлованом. В зависимости от мощности прослойки, фильтрационных свойств ее грунта, водообильности, глубины залегания и т.д., для осушения прослойки может быть рекомендован перехватывающий горизонтальный дренаж либо вертикальный дренаж, в частности иглофильтровые установки.

В случае глубокого заложения прослойки малой или переменной мощности лучше применить *второй вариант*. На откосе, в целях недопущения разрушения, предлагается организовать каптаж прослойки для разгрузки воды из прослойки в котлован, обеспечив фильтрационно-суффозионную устойчивость грунтов прослойки и недопущение эрозионного размыва откоса. Предлагается по фронту выклинивания на откос прослойки на глубину около 1,0 м заместить грунт прослойки хорошо фильтрующей призмой гравийного или щебенчатого материала. Наиболее надежным фильтрующим материалом является мелкий гравий или дресва фракцией 5 – 15 мм. Засыпка должна проверяться на суффозионную устойчивость к грунтам прослойки. При необходимости следует использовать рулонные защитно-фильтрующие материалы. В зависимости от степени суффозионности грунтов прослойки выбираются наиболее отвечающие конкретным условиям конструкции. Ниже засыпки прослойки откос следует пригрузить щебнем или гравием слоем 15 – 30 мм в зависимости от водообильности дренируемой прослойки. Пригрузку необходимо довести до бермы или до дна котлована вплоть до водоотводного лотка, уложенного в основании откоса, обеспечив гидравлическую связь стекающей по пригрузке воды с лотком.

Таким образом, пригрузка является фильтрующей засыпкой по которой осуществляется сток воды из прослойки в отводящую дренажную сеть. Скорость воды, отводимой через пригрузку, должна быть меньше размывающей. В противном случае поверхность откоса под пригрузкой должна быть защищена от водной эрозии. В зависимости от конкретных условий могут использоваться различные конструкции сооружений по отводу воды из прослойки (рис. 3).

Выводы

1. На сегодняшний день проектирование, строительство и эксплуатация глубоких котлованов промышленных и гражданских объектов ведется без учета длительного влияния на их состояние стока поверхностных и подземных вод.

2. На основании результатов полевых обследований, проведенных на построенных и строящихся глубоких котлованах, можно выделить следующие неблагоприятные факторы, ведущие к нарушению состояния котлована и развитию значительных дефектов:

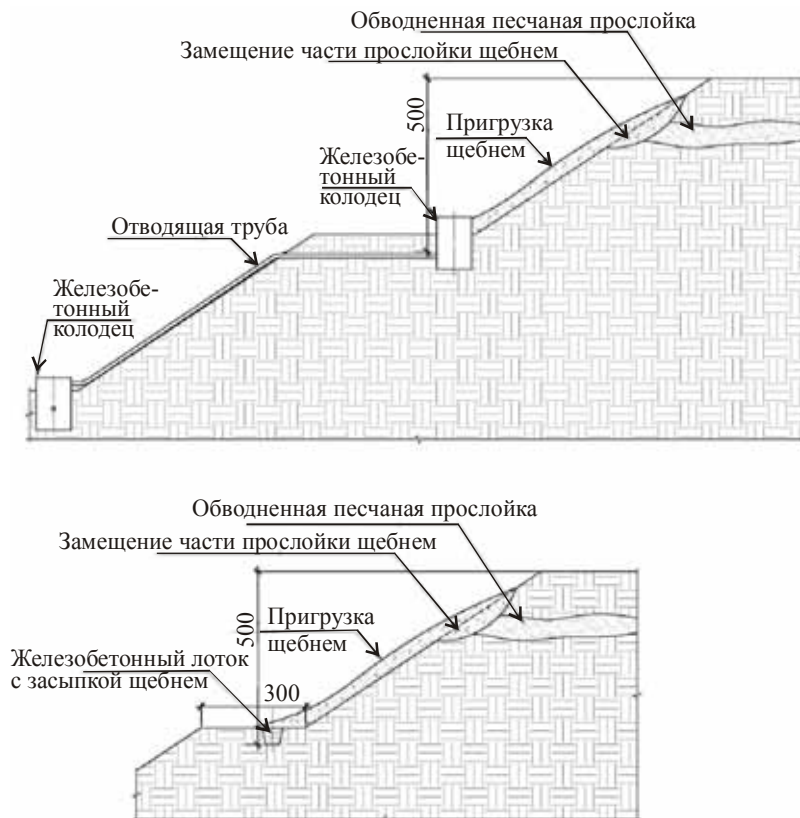


Рис. 3. Схемы сбора и отвода воды из обводненных песчаных прослоек, вскрытых котлованом

Сосредоточенный сток поверхностных вод с прилегающей территории. Водная эрозия выражается в образовании многочисленных продольных рытвин-борозд разной глубины и с разным расстоянием между ними. Глубина и ширина эрозионного русла зависит от расходов и продолжительности стока, а так же от геотехнических свойств грунта. Эрозионный процесс развивается сверху вниз, максимальный размыв наблюдается на участке, примыкающем к линии перегиба уклонов откоса. Данный тип водной эрозии может приводить к значительному разрушению откоса с образованием конуса выноса грунта к подножью откоса.

Рассредоточенный сток атмосферных осадков, выпадающих на поверхность откоса, наблюдается на слабопроницаемых грунтах, на поверхности которых инфильтрация воды ниже интенсивности выпадения осадков. Интенсивность эрозии возрастает с увеличением высоты откоса. Как правило, образуется равномерная сеть эрозионных борозд, расстояние между которыми 1,5 – 2,5 м. Исток борозды начинается как минимум на 1 м ниже бровки откоса. Процесс сопровождается выносом из тела откоса мелких фракций грунта, формированием конусов выноса, приводящим к возникновению барражного эффекта.

Сток подземных вод через выходящие на откос прослойки песчаных грунтов. Прослойки обводненных песчаных грунтов зачастую имеют незначительную мощность, что затрудняет их обнаружение при проведении

инженерно-геологических изысканий. Отсутствие достоверной информации о местоположении и мощности прослоев не позволяет учитывать их влияние на устойчивость откосов котлована при принятии проектных решений, что ведет к увеличению сроков строительства и удорожанию работ; может приводить к суффозионному выносу песчаного грунта прослойки в котлован, развитию процесса оплыва откосов, обрушению и вывалу значительных по площади грунтовых масс и, в конечном счете, замыву котлована.

3. Основываясь на практическом опыте проектирования и мониторинга состояния котлованов различного назначения, авторами статьи предложен ряд технических решений для защиты откосов глубоких котлованов от воздействия поверхностных и подземных вод, приводящего к нежелательным разрушительным последствиям.

4. Отсутствие в настоящее время аналитических способов расчета водной эрозии откосов котлована, вызванной атмосферными осадками, а так же эмпирических методик по такому расчету требует разработки рекомендаций по оценке неблагоприятного воздействия данного вида водной эрозии, основанных на результатах натуральных наблюдений, а также лабораторных и аналитических исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СП39.13330.2012.** Плотины из грунтовых материалов // Актуализированный СНиП 2.06.05-84*.
2. **СП23.13330.2011.** Основания гидротехнических сооружений // актуализированный СНиП 2.02.02-85*.
3. **СП45.13330.2012.** Земляные сооружения, основания и фундаменты // актуализированный СНиП 3.02.01-87.
4. **СП22.13330.2011.** Основания зданий и сооружений // актуализированный СНиП 2.02.01-83*.
5. **Глаговский В.Б., Липовецкая Т.Ф., Прокопович В.С.** Развитие методов оценки устойчивости системы сооружение – основание // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1996. Т.231. С. 257-271.
6. **Нгуен Фьонг Зунг.** Устойчивость откосов котлованов ГТС при инфильтрации дождевых осадков // Автореф... канд. техн. наук. 2013.
7. **Сольский С.В., Самофалов Д.П., Булганин Е.В., Головина М.П.** Исследование гидрогеологической обстановки при строительстве котлована 1-го энергоблока Ленинградской АЭС-2 // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т.256. СПб. С. 72-81.