

УДК 624.131.543

И. В. Рубцов, О. И. Рубцов, В. И. Митраков

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ГЛУБИННЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ДЛЯ ПРОТИВООПОЛЗНЕВОЙ ЗАЩИТЫ СКЛОНОВ

Приведена статистика аварий, связанных с оползновыми проявлениями, показана возможность применения глубинного закрепления грунтов с целью предотвращения оползневых процессов. Рассмотрен конкретный пример. Описана конструкция противооползневой сооружения.

К л ю ч е в ы е с л о в а : закрепление грунтов основания, инъекция, виброинъекционное глубинное закрепление, грунто-цементный шпон, противооползневая защита.

The statistics of accidents associated with the manifestations of landslides is described. The possibility of hypogene geotechnologies of soil densifications for landslide protection of proofing is shown. The specific example is considered. The construction of landslide protection structures is described.

К е у w o r d s: soil densification of ground, injection, vibroinjection hypogene densification, soil-cement scale wood, landslide protection defence.

Необходимость охраны различных сооружений, а также окружающей среды в целом от оползней возникла, прежде всего, вследствие возрастающего воздействия крупных природно-технических комплексов. Так, по данным мировой статистики, до 70 % оползневых подвижек возникает в той или иной мере в связи с деятельностью человека. Например, в округах США (штат Калифорния и Пенсильвания) 80—90 % всех оползней активизировались под влиянием деятельности человека.

Становится ощутимой постепенная безвозвратная утрата ценных территорий и земель, в том числе обжитых, вследствие естественного развития оползней. Территории, занятые сейчас жилыми постройками, дорогами и другими сооружениями, занимают 4 % площадей суши, к 2010 году они значительно увеличатся [1].

К весьма серьезным последствиям могут вести оползневые явления на авто- и железнодорожных магистралях нередко с длительными перерывами в движении, в связи с залами и, в особенности, со смещением дорожного полотна или мостовых сооружений в плане и по высоте.

Немаловажное значение рассматриваемый вопрос приобретает применительно к откосам земляных сооружений (насыпей) и выемок. Повышение крутизны откосов ведет, естественно, к уменьшению объема земляных работ и, следовательно, к уменьшению общей стоимости сооружения, вместе с тем, чрезмерная их крутизна — к угрозе нарушения условий эксплуатации сооружений и даже аварийным последствиям.

Особенно часто с оползневой проблемой приходится сталкиваться в практике гидроэнергетического строительства. При выборе створов плотин очень важным оказывается оценка устойчивости бортов долин в их береговых примыканиях.

Нередко очень важным является также обеспечение устойчивости бортов вновь создаваемых водохранилищ, в особенности при их сработке в процессе

эксплуатации со связанными с ними напорными сооружениями. Особое положение создается при малой емкости водохранилищ и большом объеме обвальных масс. Обвал в водохранилище плотины Вайонт (Италия) при объеме обвальных и оползших земляных масс порядка 250 млн м³ сопровождался образованием волны высотой несколько десятков метров, обрушившейся на нижерасположенный город Ланжерон. При этом погибло свыше 4000 чел. [2].

Оползневые явления по берегам вновь создаваемых водохранилищ, когда смачиваются толщи грунтов, залегавшие ранее выше уровня грунтовых вод, носят самый обычный характер. Эти явления почти во всех случаях осложняются при колебаниях уровня воды в водохранилищах. Иногда на берегах возникают провальные явления за счет выноса из толщи береговых склонов песчаных масс. Следует также отметить, что продукты обвалов и оползней уменьшают собой полезный объем водохранилищ и во многих случаях ускоряют процесс их заиливания. Оползание суглинистых покровов, перекрывающих собой крутые трещиноватые скальные борта ущелий в основаниях плотин, нередко приводит к увеличению фильтрационных потерь.

Противооползневая защита должна осуществляться с учетом региональных и локальных особенностей развития оползней применительно к задачам безаварийной эксплуатации сооружений и оптимального использования защищаемых территорий и обеспечения окружающей среды. Защитные мероприятия подразделяются на активные (когда ставится задача предотвращения оползней) и пассивные (когда обеспечиваются сохранность и нормальная эксплуатация защищаемых объектов в объектах продолжающегося развития указанных явлений). К активным мероприятиям относятся: уположение и террасирование склонов, удаление неустойчивых масс и поверхностных водоотводов, дренирование склонов.

Пассивные мероприятия включают: 1) перемещение объекта (проектируемого или действующего) за пределы воздействия оползней; 2) организацию службы наблюдения и оповещения в целях определения сроков заблаговременного удаления защищаемых объектов и людей из опасной зоны, а также для своевременной подготовки мероприятий по предотвращению опасных последствий, вызванных смещением оползней; 3) принятие проектных решений, позволяющих нормально эксплуатировать объекты в условиях продолжающихся смещений оползней (тоннели, прокладываемые ниже подошвы смещающихся масс; улавливающие противообвальные сооружения; фундаменты защищаемых сооружений в виде опор, рассчитанных на обтекание оползневыми массивами; лотки для пропуска селей над защищаемыми объектами). Пассивные защитные мероприятия вносят минимальные изменения в геологическую среду и не нарушают природных условий возникновения обвально-оползневых явлений.

Влияние активных защитных мероприятий многообразнее; по воздействию на окружающую среду они подразделяются на три группы. К первой группе относятся мероприятия, практически не нарушающие облик природных склонов и не изменяющие геологическую среду (применение удерживающих свай и шпон, а также анкерных конструкций, закрепление грунтов цементацией и другими методами). Мероприятия второй группы (агролесомелиорация, поверхностный водоотвод, защитные покрытия, противопожарные сооружения, удаление неустойчивых масс, контрбанкеты) изменяют пер-

воначальный вид склонов, не вызывая неблагоприятных последствий на примыкающих к ним территориях. В третью группу входят мероприятия, которые могут оказывать существенное воздействие на территории, примыкающие к склонам (уположение и дренирование склонов, применение берегозащитных сооружений и т. п.). Например, дренирование может привести к понижению уровня подземных вод, что, в свою очередь, может усилить развитие суффозионных процессов (из-за увеличения гидравлических градиентов) и ухудшить условия сельскохозяйственного использования площадей, примыкающих к склонам с верхней стороны.

Основными принципами осуществления инженерной защиты, общими для платформенных и горно-складчатых областей, являются следующие:

- предотвращение или ослабление воздействия на массивы пород экзогенных геологических процессов, приводящих к снижению устойчивости склонов (эрозия, выветривание, суффозия и т. п.);

- учет прогноза изменений инженерно-геологических условий в процессе строительства и эксплуатации сооружений на оползне-обвальных территориях (подрезы и пригрузки склонов, увеличение их обводненности в результате хозяйственной деятельности, вибрационные нагрузки, изменения напряженного состояния склонов в результате извлечения из недр нефти и газа, проходка подземельных выработок и т. п., антропогенное оттаивание многолетнемерзлых пород и др.);

- назначение защитных мероприятий с учетом масштабности (объема) и типа наблюдающихся и прогнозируемых оползней, а также цикличности их развития. Например, при объемах смещения в десятки миллионов кубических метров, как правило, наиболее целесообразно удаление защищаемого объекта и людей из опасной зоны. При прочих равных условиях наибольший объем противооползневых мероприятий требуется в стадии противооползневого цикла, предшествующего моменту предельного равновесия;

- выбор наиболее экономичных направлений и комплекса охранно-защитных мероприятий, обеспечивающих заданную проектом степень устойчивости склона и охрану окружающей среды;

- предотвращение возможности загрязнения окружающей среды канализационными водами и особенно токсичными и радиоактивными веществами в результате развития оползневых и обвальных деформаций;

- рассмотрение инженерной и экономической целесообразности использования противооползневых сооружений в качестве элементов конструкций защищаемых объектов (например, использование противооползневых удерживающих свай как фундаментов жилых зданий, возводимых на оползневом склоне). При наличии оползней-потоков необходимо рассмотреть возможность применения защищаемых сооружений (опоры мостов и др.), рассчитанных на обтекание ползающих масс [1].

Увеличение числа техногенных катастроф, связанных с оползневыми явлениями на естественных склонах, в береговых склонах рек, морей и искусственных сооружений, требует дальнейшего развития способов технической мелиорации грунтов как средства предотвращения экологических нарушений.

Использование геотехнологий, регулирующих прочность и водопроницаемость горных пород, решает экологические проблемы, связанные с охраной окружающей среды при обеспечении устойчивости склонов и охраной

подземных вод путем регулирования их режимов водопроницаемыми завесами, ликвидацией утечек из наземных и подземных источников загрязнения.

Большое значение в предотвращении техногенных катастроф и снижения экологической нагрузки на природную среду имеют способы технической мелиорации грунтов при защите подземного пространства на застроенных территориях, где на первое место часто выходят экономические вопросы, связанные с эксплуатационными затратами подземных коммуникаций.

В отдельное направление выделяют работы по борьбе с оползневыми деформациями естественных склонов, береговых зон рек и морей, где наибольшую опасность и сложность в реализации противооползневых мероприятий представляют структурные консеквентные оползни, имеющие мощность несколько десятков метров. Все специальные способы строительства в сложных инженерно-геологических условиях при эксплуатации застроенных территорий в зонах подтопления техногенными и естественными водами также связаны в большей или меньшей мере с задачами технической мелиорации грунтов [3].

Решение перечисленных проблем невозможно без соответствующего анализа и пополнения базы данных создаваемых геотехнологий, их классификации по технико-экономическим условиям применения.

Одним из направлений в области современной геотехнологии является ресурсосберегающий экологически чистый способ виброинъекционного глубинного закрепления грунтов и технология создания удерживающих шпон с применением энергии взрыва малых камуфлетных зарядов.

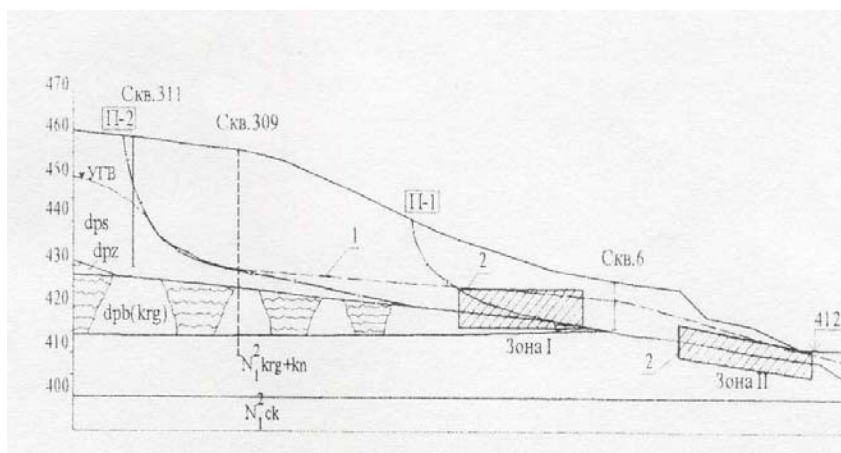
Использование вибрационной техники при внедрении инъекторов специальной конфигурации в грунт позволяет интенсифицировать производственные операции и в процессе инъекции применять суспензии на основе цемента, при этом в 2—3 раза повысить производительность, снизив в 1,5 раза энерго и трудозатраты, а следовательно, и стоимость закрепления. Применяемая техника позволяет выполнять работы в стесненных условиях со сложным рельефом местности; сооружать наклонные сваи под углом до 30° к вертикали. Массив грунта закрепляется сложными или отдельно стоящими грунто-цементными сваями круглой или ребристой формы поперечного сечения диаметром 0,4...0,8 м. Скорость закрепления 6...7 м³/ч.

Способ виброинъекционного закрепления грунтов использован на монтаже бумагоделательной машины Балахнинского ЦБК, при опытном закреплении обратной засыпки насосной станции № 1 и откосов гидротехнической плотины Запорожской АЭС, а в комплексе с технологией камуфлетных шпон при создании противооползневого удерживающего элемента на оползне № 9 естественного склона в районе НС-5 Сонгилеевского водопровода г. Ставрополя.

Для условий оползневой деформации № 9 был разработан проект противооползневых мероприятий, предусматривающих реализацию глубинных геотехнологий закрепления грунтов.

Оценка устойчивости склона на участке оползня показала, что с учетом гидрогеологических факторов и природных грунтовых условий коэффициент запаса устойчивости склона по поверхности скольжения П-1 составляет 1,11, а по П-2 1,26, что ниже нормативного значения и не обеспечивает длительную устойчивость склона и безопасные эксплуатации насосной станции № 5 [4]. Расчетная схема устойчивости склона с указанием проектных зон

глубинного укрепления грунтов приведена на рис. 1. С учетом масштаба развития оползня проектом было предусмотрено создание двух зон закрепления. Основные проектные решения по закреплению грунтов на опытно-промышленном участке оползневого массива приведены на рис. 2. План опытного участка приведен на рис. 3. Технология виброинъектирования цементных растворов обеспечивает сооружение грунто-цементных шпон размером $0,7 \times 4$ м и глубиной до 12 м и нагнетанием цементно-песчаного раствора в процессе погружения и подъема иньектора. Производительность одной установки зависит от глубины и характеристик укрепляемых грунтов.



Графическое приложение

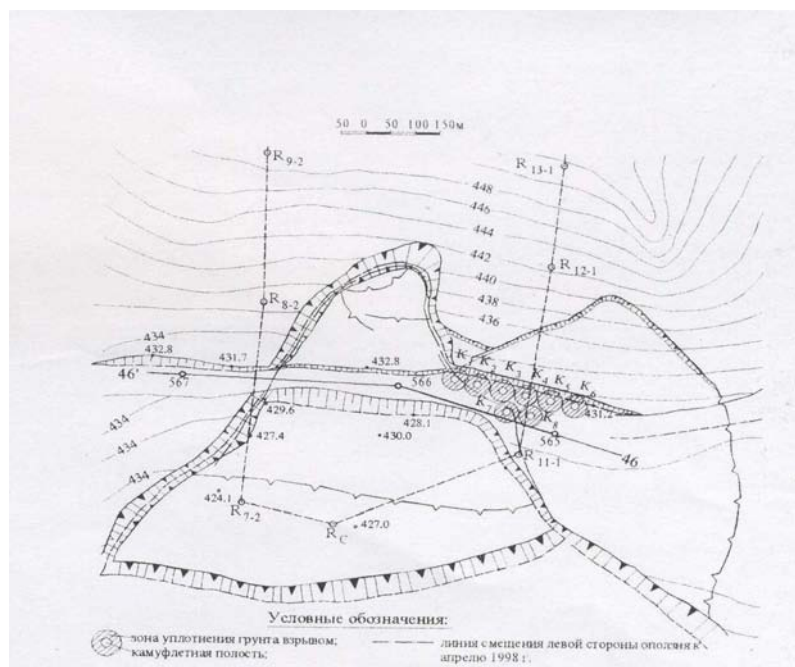


Рис. 1. Расчетная схема устойчивости склона в районе оползня № 9

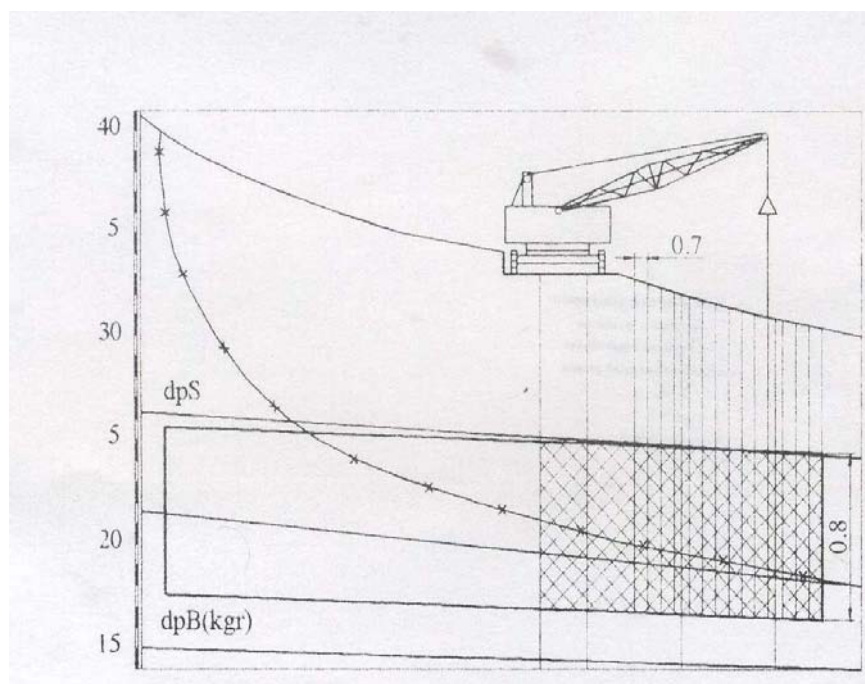


Рис. 2. Схема расположения шпона закрепленного грунта

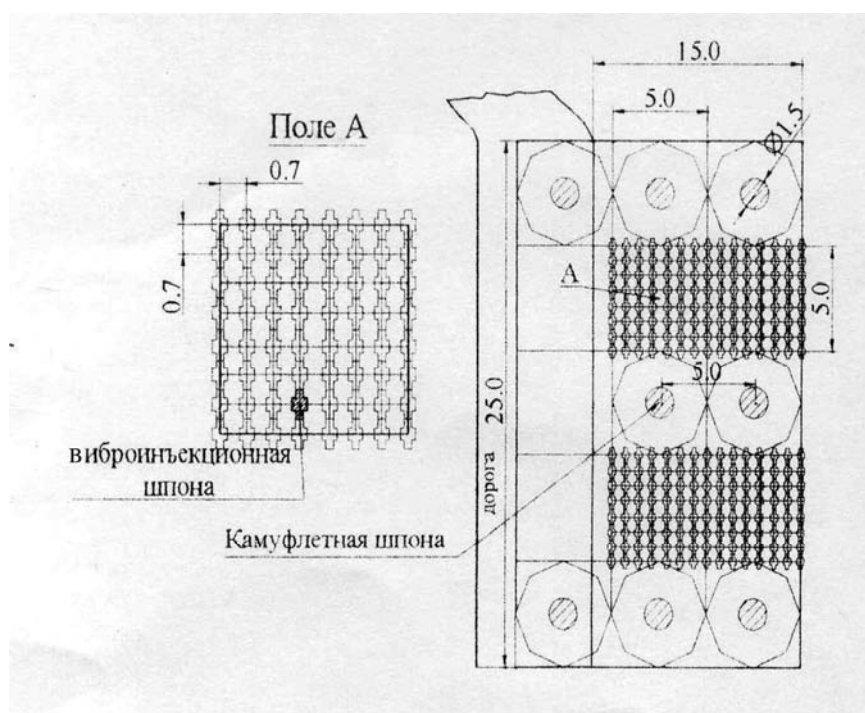


Рис. 3. План опытно-экспериментального участка по глубинному закреплению грунтов камуфлетными шпонами

Создание камуфлетных шпон с применением энергии взрывов в условиях оползня № 9 обеспечивает создание цилиндрической полости диаметром до 1,5 м и высотой 4...6 м, которая заполняется цементно-песчаным раствором или песком с виброуплотнением. Наряду с этим энергией взрывов уплотняют вмещающие породы в радиусе до 3 м, что обеспечивает увеличение сопротивления пород сдвигу в 2...2,5 раза по отношению к исходному состоянию, при этом наиболее существенно изменяется величина угла внутреннего трения. Следует также отметить, что площадь уплотненной зоны составляет не менее 90 % общей площади закрепления в пределах единичной камуфлетной шпоны. Применительно к условиям оползня № 9 реализация единичной шпоны обеспечивает получение дополнительного удерживающего усилия до 140 т.

Проект противооползневого удерживающего элемента был реализован в 2001 году на опытно-экспериментальном участке в пределах первой зоны.

Создание камуфлетных шпон на кровле блоковой фракции обеспечивает дополнительное удерживающее усилие по поверхности скольжения в 28...56 т на погонный метр склона. Глубина проработки зон определяется как величиной их защемления в основании поверхности скольжения, так и высотой, исключающей обтекание грунтовым массивом. В пределах локального оползневого блока влияние двух смежных камуфлетных шпон, расположенных по падению склона, увеличивает местную устойчивость до величины коэффициента запаса 1,24, т. е. на 13 %. Последующие геодезические наблюдения за деформацией склона показали, что реализация противооползневого удерживающего сооружения предотвратила дальнейшее развитие оползня и стабилизировала местную устойчивость склона.

По результатам опытно-экспериментальных работ разработана конструкция противооползневого удерживающего сооружения. Противооползневое удерживающее сооружение включает ряды свай, комбинированных из камуфлированных полостей, заполненных материалом необходимых прочностных характеристик, и стволов скважин, заполненных твердеющим материалом.

Расстояние между сваями определяется выражением

$$L=2(R_n+\delta),$$

где R_n — радиус камуфлированной полости, м; $\delta = k\Pi_{\text{exp}}E$ — ширина зоны грунта, уплотненного камуфлетными взрывами, м; k — коэффициент, зависящий от влажности грунта; Π — показатель простреливаемости пород, м³/кг; E — модуль деформации грунта, кг/м³.

Выполненные опытно-производственные исследования позволяют утверждать, что виброинъекционная технология в совокупности с другими методами укрепления позволяет достигнуть эффективных результатов на оползневых участках.

В качестве такого примера можно привести работы по укреплению оползневых участков на Запорожской АЭС, выполненных в 2000 году.

Производственные объекты Запорожской АЭС расположены в прибрежной зоне Каховского водохранилища и построены на песчаных грунтах, традиционно считающихся хорошим основанием для строительства. Район промплощадки до начала строительства имел холмистый рельеф поверхности с перепадом отметок от 15,0 до 28,8 м. В процессе строительства промпло-

щадка подвергалась активной планировке до отметки 22,0 м. В проекте предусматривалось предварительное уплотнение насыпей пневмокатами до $\gamma_{ск} = 1,64...1,66 \text{ г/см}^3$. Наряду с этим дополнительный запас надежности грунтовых условий должен обеспечиваться способностью песков к восстановлению естественной структуры и самоуплотнения их во времени.

Последующая эксплуатация промышленных объектов не подтвердила наличие положительных трещин по самоуплотнению насыпных песков и подтвердила несоответствие их плотности проектным показателям. Были отмечены нарушения строительных конструкций и инженерных сетей: трещины в фундаментах трансформаторов открытых распределительных установок, сверхнормативные крены токоразрядника и неравномерные осадки колонн машинного зала, прогибы и трещинообразование бетонных плит путей перекачки трансформаторов, пустоты и полости под полами пристройки электро-технических установок и бетонных отмосток, разрушение системы канализации и т. д. Также получили развитие оползневые деформации откосов на гидротехнических сооружениях, в частности в зоне обратной засыпки НС-1.

Анализ материалов изысканий и результатов геодезических наблюдений до осадки зданий и сооружений показал, что развитие инженерно-геологических процессов на промплощадке и гидротехнических сооружениях обусловлено следующими факторами:

- несоответствием плотности песков в зонах обратной засыпки проектным показателям;
- подтоплением промплощадки и гидротехнических сооружений;
- формированием в песках обратной засыпки техногенного водного горизонта;
- вибродинамическим воздействием на грунт технологического оборудования;
- наличием сосредоточенных утечек из водонесущих коммуникаций и сооружений;
- снижением проводимости песков при их загрязнении нефтепродуктами, поверхностно-активными материалами и другими компонентами.

Наряду с этим имеют место тенденции к дальнейшему разуплотнению на обводненных участках и увеличению мощности песков рыхлого и предельно рыхлого сложения, что подтверждается результатами динамического зондирования в контрольных точках. Данные факты свидетельствуют о наличии активного технологического воздействия на песчаные грунты, залегающие в основании зданий и сооружений на глубине до 6...9 м, при формировании уровня грунтовых вод в отметках 17,3...19,7 м.

Фундаменты большинства объектов и основные подземные коммуникации промплощадки расположены на основаниях, сложенных рыхлыми насыпными грунтами плотностью $1,48...1,54 \text{ г/м}^3$. Обилие водонесущих коммуникаций приводит к повышению уровня грунтовых вод, а насыщенность их быстродвижущимися потоками жидкости и наличие промышленной вибрации способствуют перемещению песков и образованию разуплотненных зон, подземных пустот, провалов поверхности, что является следствием снижения несущей способности грунтов оснований.

Примером активизации деформационных процессов при увеличении техногенной нагрузки на грунты дамбы пруда охладителя является оползень

в зоне обратной засыпки НС-1. Цикличная активизация оползня прибрежного откоса в период пуска насосных агрегатов была обусловлена резким изменением гидрогеологических условий в песках обратной засыпки и вибрационным воздействием на песчаный массив.

Виброкартированием зоны обратной засыпки установлено, что изменение скоростных и частотно-амплитудных характеристик колебания грунтов проявляется на удалении до 30 м от технологических водоводов. При совместной работе смежных водоводов уровень скоростей смещения песчаного массива составит для зоны центральных водоводов 6,11 мм/с и зоны крайних водоводов 3,06 мм/с. С учетом реальной пористости песков рыхлого ($m = 44\%$) и предельно рыхлого сложения данный уровень динамического воздействия в водонасыщенном грунтовом массиве вызывает снижение коэффициента внутреннего трения песков в 1,3...2,5 раза соответственно.

При данном уровне динамического воздействия на песчаный массив, а также дополнительном фильтрационном давлении и сейсмичности, устойчивость откосов дамбы пруда охладителя и несущая способность грунтов в основании трубопроводов на участке обратной засыпки не обеспечивается. Для обеспечения нормативных требований по безопасным условиям эксплуатации гидротехнических сооружений и технологического оборудования был разработан проект создания удерживающих элементов из закрепленного песчаного грунта как в основании трубопроводов, так и в призме сдвига откоса дамбы.

В призме движения откоса удерживающий элемент сооружения из закрепленного песчаного грунта выполнен по виброинъекционной технологии путем создания свайного поля. Сооружение цементно-песчаных свай глубокого заложения предусматривается на двух участках. В низовой части откоса формируется трехрядное свайное поле на глубину 6,2...6,5 м ниже подошвы предельно-рыхлых песков при ширине захвата 2,4 м. На отметках 16,5...17,0 м формируется второй участок свайного поля из четырех свай на погонный метр откоса. Формирование свайного поля в призме сдвига откоса предусматривает наличие зон разгрузки фильтрационного потока на протяжении всего участка закрепления. С учетом данных удерживающих элементов устойчивость приоткрытого массива обеспечивается с нормативным коэффициентом запаса по всем трем семействам поверхностей.

Выполненные исследования и опытные работы в натурных условиях показали, что вибрационные технологии с использованием истинных цементных растворов и суспензий являются эффективным методом управления устойчивостью и несущей способностью песчаных массивов как на гидротехнических сооружениях, так и промплощадке ЗАЭС. Вибрационные технологии обеспечивают избирательное закрепление песчаных грунтов в зонах их рыхлого и предельно-рыхлого сложения на глубинах до 15...17 м. В условиях застроенных территорий сооружение цементно-песчаных свай с применением данных технологий может выполняться как при вертикальном, так и при наклонном их заложении под углом до 30...45° от вертикали. В зависимости от типа инъектора диаметр цементно-песчаных свай составляет 0,6...0,8 м. Высокие прочностные характеристики песков после закрепления ($\sigma_{сж} = 3,0...5,4$ МПа) обеспечивают переход грунта в другое состояние, что резко превышает их несущую способность и делает невосприимчивыми к воздействию техногенных факторов.

Для обеспечения безопасной эксплуатации технологических объектов ЗАЭС разработана геоинформационная система по управлению инженерно-геологическими процессами (структурная схема). Данная схема отражает как специфику грунтовых условий, так и характер техногенных факторов, влияющих на снижение деформационных свойств грунтов, залегающих в основании зданий и сооружений. Первоочередным этапом ее реализации является паспортизация зданий и сооружений, а также водонесущих коммуникаций, и современная оценка их технического состояния. При наличии аварийных ситуаций разрабатываются локальные проекты по глубинному закреплению грунтов в основании объектов или дренажных мероприятий. На последующих этапах предусматривается проведение мониторинговых работ по количественной оценке влияния всех типов техногенных факторов на изменение грунтовых условий с разработкой типовых технологических схем по локализации их негативного воздействия. В условиях застроенных территорий и необходимости локального усиления основания фундаментов зданий и сооружений, а также ремонта подземных коммуникаций необходима разработка технологических регламентов по закреплению грунтов с применением вибротехнологий, учитывающих геотехнические параметры грунтового массива и конструктивные параметры фундаментов.

Ведение базы данных о состоянии зданий и сооружений, а также динамики изменения грунтовых условий в процессе их эксплуатации является основной для принятия решения по разработке проектно-сметной документации на закрепление оснований и реконструкцию инженерной защиты промплощадки и гидротехнических сооружений от подтопления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теоретические основы инженерной геологии. Социально-экономические аспекты / под ред. Е. М. Сергеева / М. : Недра, 1985.
2. Маслов Н. Н. Механика грунтов в практике строительства. М. : Стройиздат, 1977.
3. Ломтадзе В. Д. Инженерная геодинамика. М. : Недра, 1997.
4. СНиП 2.045—90. Инженерная защита территории зданий и сооружений от опасных геологических процессов. М. : Госстрой, 1991.
1. Teoreticheskie osnovy inzhenernoy geologii. Sotsialno-ekonomicheskie aspekty / pod red. E. M. Sergeyeva / M. : Nedra, 1985.
2. Maslov N. N. Mechanika gruntov v praktike stroitelstva. M. : Sroyzdat, 1977.
3. Lomtadze V. D. Inzhenernaya geodinamika. M. : Nedra, 1997.
4. SNIIP 2.045—90. Inzhenernaya zashita territorii zdani i sooruzheni ot opasnykh geologicheskikh protsessov. M. : Gosstroy, 1991.

© Рубцов И. В., Рубцов О. И., Митраков В. И., 2011

Поступила в редакцию
в октябре 2011 г.

Ссылка для цитирования:

Рубцов И. В., Рубцов О. И., Митраков В. И., Современные методы глубинных геотехнологий закрепления грунтов для противооползневой защиты склонов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 4(19).