



*Д.М. Антоновский,
главный инженер ООО «Белгеосинт»*

НАСЫПИ НА СВАЯХ С ГИБКИМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМ РОСТВЕРКОМ

За последнее десятилетие в России построено достаточное количество насыпных грунтовых сооружений (прежде всего, насыпей автомобильных дорог) на свайном основании с гибким геосинтетическим ростверком для того, чтобы можно констатировать, что подобное инженерное решение уже вошло в отечественную строительную практику.

Серьезный опыт проектирования подобных сооружений, в частности, имеют такие проектные институты, как «Стройпроект», «Дорсервис», «Союздорпроект», научная организация НИЦ «Мосты» при ЦНИИС, а также компании «Ареан-Геосинтетикс», «Астроликс», «Миаком» и некоторые другие. Среди значимых строительных объектов в масштабе страны, где данная технология применялась неоднократно, можно назвать Кольцевую Автомобильную Дорогу вокруг Санкт-Петербурга, а также строящуюся в настоящее время скоростную платную автомобильную дорогу М-11 Москва – Санкт-Петербург.

В настоящей статье автор, используя свой скромный практический опыт в данной области, предпринимает попытку описания особенностей расчетов и практической реализации данной технологии, а также хочет предостеречь от основных ошибок,

возникающих в процессе их проектирования и строительства.

Насыпи на сваях применяются в инфраструктурном строительстве (прежде всего, дорожном и железнодорожном) для решения различных задач, связанных как с повышением несущей способности грунтового основания, так и устранения процесса консолидации грунта основания как такового, сокращения величины осадки насыпи фактически до нулевого значения и полного устранения неравномерности осадки. Гибкий геосинтетический ростверк (обычно представляющий собой два слоя высокопрочных армирующих геосинтетических материалов – тканых или вязаных геополотен или плоских одноосноориентированных георешеток, причем первый, нижний слой, укладывается поперек направления движения транспорта, верхний слой – вдоль) устраивается на уровне голов свай или оголовков, либо с незначительным

превышением этой высотной отметки. Применение гибкого геосинтетического ростверка сделало экономически возможным строительство насыпных сооружений на сваях в сложных условиях, обеспечивая значительную экономию по сравнению с монолитным бетонным ростверком. Рассматриваемая технология имеет различные модификации, некоторые из которых можно уже назвать отдельными технологиями – в частности, технология текстильно-песчаных свай. Кроме этого, существуют другие вариации – буронабивные сваи, инъекционные сваи и т.д. В настоящей статье речь пойдет о сборных железобетонных сваях с применением геосинтетического ростверка.

Одной из главных особенностей рассматриваемой технологии является безосадоочность насыпных сооружений, поскольку сваи опираются на несущий грунт. В большинстве случаев сваи устраиваются по квадратной или прямоугольной сетке в плане, гораздо реже – в шахматном порядке (по треугольной сетке в плане). Гибкий геосинтетический ростверк (при условии его правильного расчета, разумеется) представляет собой саморегулируемую систему восприятия нагрузок и их пропорционального перераспределения на головы свай и грунт межсвайного пространства. При этом переменными и взаимосвязанными являются следующие величины: активизированное усилие в армирующем материале и величина провиса материала над межсвайным пространством, а также реакции отпора от свай и грунта межсвайного пространства.

Насыпи на сваях с гибким геосинтетическим ростверком достаточно часто применяются при прохождении высоких насыпей по грунтовому основанию с недостаточной несущей способностью. Чаще всего речь идет об органических грунтах основания (илы, торфы, сапропели) слабых глинистых грунтах или грунтах с очень высокой неоднородностью свойств (чаще всего техногенных). Данная технология также перспективна для применения при наличии лёссовых и тиксотропных грунтов основания, а также при потенциальной опасности протекания карстовых процессов в грунте основания. Для последнего случая, а также в ряде

других ситуаций расчетная модель позволяет учесть полное отсутствие грунта в межсвайном пространстве (то есть нулевое значение реакции отпора грунта межсвайного пространства со свободным провисом армирующего геосинтетического слоя), что потребует, однако, применение более прочных геосинтетических материалов либо необходимость сокращения шага свай.

Кроме этого, данная технология успешно применяется для насыпей подхода к мостовым сооружениям в случаях, когда прогнозируемая фактическая величина осадки насыпи превосходит максимально допустимое значение. В подобных ситуациях грунт основания может и не относиться к слабым (например, он может иметь значение модуля деформации 9-12 МПа), и в случае возведения обычной насыпи на данном основании устойчивость может быть обеспечена без каких-либо дополнительных мероприятий. В подобных ситуациях, помимо обеспечения устойчивости по второму предельному состоянию, снижается величина перепада жесткости при переходе с мостового полотна на покрытие поверх грунтовой конструкции. Для экономии в некоторых проектах также применяют схему расположения свай в плане с двумя или тремя различными значениями шага свай – с более плотным свайным полем в непосредственной близости к мостовому сооружению и с менее плотным – при удалении от него. Поскольку данные насыпи подхода к мостовым сооружениям чаще всего имеют небольшую протяженность (обычно порядка 50–200 м, в зависимости от высоты насыпи и параметров грунтового основания), чаще всего применяют унифицированный тип армирующих геосинтетических материалов при различных значениях шага свай.

Механизм работы гибкого ростверка поверх свайного основания следующий. После завершения строительства насыпи и открытия движения система приобретает свое расчетное равновесное состояние – армирующий геосинтетический материал набирает прогнозируемую прочность и приобретает расчетное относительное удлинение, за счет чего появляется расчетная величина провиса материала над грунтом межсвайного

пространства (максимальное значение величины провиса при квадратной или прямоугольной схеме расстановки свай в плане, естественно, приходится на точку пересечения диагоналей данного квадрата или прямоугольника). Процент распределяемых армирующим геосинтетическим ростверком усилий на сваю (или межсвайный грунт) зависит от соотношения площади сваи к площади влияния данной сваи, а также соотношения жесткости (модуля деформации) сваи к межсвайному грунту. При этом вырабатываются определенные реакции отпора от свай и грунта межсвайного пространства. При нарушении равновесия системы, например, при временном приросте воспринимаемых нагрузок (в пределах допустимых величин), армирующий геосинтетический материал вырабатывает повышенную прочность, за счет чего увеличивается его относительное удлинение и увеличивается величина провиса, вследствие чего нарушается баланс перераспределения нагрузок. Однако при этом также происходит увеличение реакции отпора грунта, за которым следует снижение величины прогиба и величины рабочей прочности армирующего материала, благодаря чему неизбежно увеличивается передаваемая нагрузка от геосинтетического материала на сваю. За счет этого система возвращается в состояние, близкое к первоначальному (до момента увеличения воспринимаемых нагрузок).

Помимо этого, также нужно принимать во внимание процесс ползучести армирующего геосинтетического материала во времени под действием постоянно воспринимаемых нагрузок. Для его учета в течение всего срока службы сооружения необходимо иметь результаты испытаний применяемых геосинтетических материалов на ползучесть, семейство изохрон ползучести с полученными методом аппроксимации функциональными зависимостями относительной прочности материала от его относительного удлинения на момент окончания его работы в течение временного промежутка, определяемого соответствующей изохроной. Излишне говорить о том, что в конце расчетного срока службы выработанная прочность и относительное удлинение армирующего геосинтетического материала

не должны превышать максимально допустимых значений с принятым в расчете запасом.

К сожалению, в России на сегодняшний момент отсутствует нормативный документ, позволяющий произвести расчет гибкого ростверка для насыпи на сваях. Однако наличие достаточно качественно проработанного нормативного документа ОДМ 218.2.054-2015 «Рекомендации по применению текстильно-песчаных свай при строительстве автомобильных дорог на слабых грунтах основания» позволяет надеяться, что подобный документ появится в ближайшие годы применительно к рассматриваемой в настоящей статье технологии.

В связи с этим сейчас при проектировании базируются на зарубежных нормативных документах. Из них по популярности можно выделить два документа – Стандарт Великобритании BS 8006 и Рекомендации по проектированию и расчетам грунтовых конструкций с применением геосинтетических материалов [1], издаваемые Немецким обществом геотехники. В основе данных документов фактически лежат разные расчетные модели, также есть отличия в принципах назначения требуемых характеристик армирующих геосинтетических материалов. К сожалению, автор не может однозначно сказать, какая из двух методик лучше и является более точной. Однако предварительно можно сделать вывод о том, что по результатам расчетов одних и тех же объектов по двум различным методикам (с идентичными исходными данными) при возведении насыпи с вертикальными или близким к вертикальным откосами (с дополнительным их армированием) результаты расчетов в первом приближении являются близкими, а при расчетах насыпей со стандартными или несколько более крутыми откосами требуемая прочность армирующих материалов по немецкой методике оказывается выше. Последнее связано с различными подходами к определению усилий распора от откосов в расчетных моделях. Автор в своих расчетах старается опираться на немецкую методику расчетов, приведенную в разделе 9 источника [1], находя более обоснованной расчетную модель, а также на основании

результатов ряда проведенных в Германии испытаний и сопоставления результатов мониторинга действующих сооружений с результатами расчетов на стадии проектирования.

Необходимо отметить, что начиная с 2010 года (или с международного издания 2011 года на английском языке), расчетная модель EBGEО претерпела ряд изменений. Из существенных можно выделить изменение подхода к определению силы распора от откосной части насыпи (что приводит к более высокой требуемой прочности армирующих материалов), а также переход от одномерного определения величины провиса армирующего материала (ранее применялся подход, схожий с подходом теории струн) к двумерному (подход, близкий к теории оболочек, с учетом так называемого мембранного эффекта), что значительно ближе к реальному поведению материалов в данных конструкциях.

По завершению расчетов и назначения требований к армирующим геосинтетическим материалам, необходимо произвести соответствующие расчеты устойчивости откоса конструкции аналитическими методами. Также в целях проверки результатов расчетов неплохо использовать численные методы (например, метод конечных элементов), в первую очередь, для расчетов по второму предельному состоянию.

При проектировании конструкций и подборе требуемых армирующих материалов, прежде всего, производят сбор существующих нагрузок, численную оценку параметров грунта в межсвайном пространстве на основании сконфигурированного свайного поля. После этого вычисляются напряжения, передаваемые грунту в межсвайном пространстве. Далее определяются усилия в армирующем геосинтетическом материале с учетом его мембранного эффекта. На основании данных прочности, ползучести и других характеристик определяется расчетное значение провиса, после чего подбираются требуемые прочностные характеристики геосинтетических материалов, достаточные для восприятия действующих нагрузок в данных условиях.

Расчетную прочность армирующих геосинтетических материалов можно

вычислять не по немецким нормам, а на основании результатов сертификационных испытаний геосинтетических материалов в соответствии с ОДМ 218.2.047-2014 «Методика оценки долговечности геосинтетических материалов, используемых в дорожном строительстве». Анализ указывает на сходимость получаемых результатов, а в ряде случаев расчетная прочность одного и того же материала по российской методике может оказаться меньше, чем по немецкой, прежде всего за счет коэффициентов учета влияния морозоустойчивости или воздействия микроорганизмов.

При конструировании гибкого ростверка настоятельно рекомендуется обойтись всего двумя слоями армирующих геосинтетических материалов. Расположение слоев геосинтетики должно быть как можно ближе к высотному уровню голов свай. Указанными двумя предпосылками достигается максимальная надежность и ресурсоэффективность конструкции. При этом нижний армирующий слой, укладываемый поперек направления движения в плане, должен лежать или непосредственно на высотном уровне оголовков свай, или не более чем на 0,30 м выше. В качестве нижнего слоя можно использовать геоткани или плоские георешетки. В зависимости от шага свай, величин нагрузок и параметров грунтов основания прочность нижнего слоя чаще всего лежит в пределах от 300 до 1200 кН/м. Для предотвращения проникания минеральных зерен заполнителя насыпи в межсвайное пространство в качестве нижнего слоя гибкого ростверка выбирают либо геоткань, либо на уровне оголовков свай конструктивно укладывают нетканый иглопробивной геосинтетический материал, а на высоте обычно 0,10 – 0,15 м от него – плоскую армирующую георешетку. Второй слой укладывается над первым на высоте 0,30 – 0,50 м в направлении движения транспорта в плане. В качестве второго слоя также применяют геоткань или плоскую георешетку. В случае вертикальных откосов при квадратной сетке свай в плане прочность второго слоя равна прочности первого. При наличии откосов (опять же при квадратной сетке свай в плане) прочность второго слоя обычно в 1,5 – 3 раза ниже прочности первого

(разумеется, необходимо производить соответствующие расчеты, цифры здесь приведены лишь для ориентира). Чаще всего для армирующих слоев гибкого ростверка применяют геосинтетические материалы из полиэфира, нерастворимых водой поливинилспиртовых или арамида, в зависимости от требуемой ползучести, деформативности и осевой жесткости материала, а также исходя из экономической целесообразности. Далее, необходимо произвести обратную анкеровку геосинтетических слоев на расчетные величины для обеспечения стабильности их геометрического положения в процессе эксплуатации.

Шаг свай чаще всего определяется экономическими расчетами, возможностями технологии и наличием технической возможности производства геосинтетических материалов полученной расчетной прочности. Снизить стоимость проекта помогают сборные бетонные оголовки, одеваемые поверх свай. Они имеют квадратное сечение в плане со стороной от 0,80 до 1,20 м (в зависимости от геометрических параметров поперечного сечения сваи и схемы армирования оголовков). За счет обеспечения повышенной площади восприятия нагрузки сваей, их применение позволяет, увеличив шаг свай в плане, уменьшить требуемое число свай. Сваи необходимо располагать под всей поверхностью основания земляного полотна, в том числе под откосными частями.

Также нужно увязать минимально допустимый перехлест армирующих геосинтетических материалов (здесь он, как и в ряде других случаев, составляет не менее 0,50 м, что соответствует общей рекомендации ОДМ 218.5.006-2010 «Рекомендации по методикам испытаний геосинтетических материалов в зависимости от области их применения в дорожной отрасли») с расположением свай в плане, поскольку нахлест должен проходить строго над головами свай (или оголовками). Поскольку станки для производства геосинтетических материалов отличаются производителями и классами машин, ширина рулонов на выходе может быть разной. Особенно это актуально для нижнего, обычно более дорогого, армирующего слоя. Казалось бы, мелочь, но если шири-

на оптимально выбранного рулона материала под шаг свай с учетом минимального нахлеста составляет 5,20 м, то применение рулонов материала шириной уже 5,0 м (при невозможности изменения шага свай с соответствующими перерасчетами) приведет к значительному увеличению требуемых объемов (не менее 20-25%) с учетом указанного требования, а применение материала шириной 5,35 м не приведет к экономии, а лишь увеличит требуемый расход (на эти 15 «лишних» сантиметров в каждом полотне), правда, немного повысив надежность конструкции. Для снижения сметы проекта также необходимо изготовить план раскатки каждого слоя материала, после чего посчитать требуемые геометрические характеристики каждого рулона, после чего сделать заказ на заводе-изготовителе рулонов нестандартной длины (с целью избежать образования некондиционных обрезков) в соответствии с проектной спецификацией. Это связано с тем, что нижний армирующий слой должен укладываться строго цельным полотном, стыки в направлении армирования недопустимы! Для верхнего слоя можно использовать рулоны стандартной длины при протяженном участке насыпи на сваях, при этом стык армирующих полотен должен составлять от 1,5 до 2,5 шагов свай в плане, а данные стыки должны быть разнесены друг от друга (то есть продольные стыки соседних армирующих полотен не могут иметь одинаковые пикетные отметки). Для непротяженных участков насыпей на сваях, рулоны армирующих материалов для второго слоя также заказывать у завода-изготовителя нестандартной длины. Особо необходимо подчеркнуть, что если насыпь на сваях проходит по криволинейному в плане участку, здесь нужно особо тщательно подходить к компоновке расположения свай в плане и схеме раскладки армирующих материалов, при этом при обеспечении минимально допустимого нахлеста на крайней свае ближе к центру кривой в плане, величина нахлеста на крайней свае с другой стороны может быть близка к ширине рулона армирующего геосинтетического материала. Также при стандартной компоновке свай рас-

четная прочность армирующих слоев должна быть увеличена на рассматриваемом участке на коэффициент, обратный косинусу угла между направлением трассы в плане и касательной к радиусу кривой в данной точке.

Для предотвращения образования так называемых «грибов» (то есть деформаций в виде чаш прогибов в точном соответствии расположению межсвайных пространств) на поверхности покрытия, минимальная высота насыпи (без учета слоев основания и покрытия дорожной одежды) должна составлять не менее 1,5 м, рекомендуемая – не менее 2,0 м. При невозможности выполнения данных требований по отметкам бровки земляного полотна, требуется произвести выемку грунта основания на нужную глубину и понижение высотного уровня голов свай.

В процессе производства строительных работ требуется строгое соблюдение технологий производства работ. Должен быть также обеспечен строгий контроль качества. В первую очередь, необходимо обеспечить качество и геометрическую точность забивки свай, качество уплотнения грунта межсвайного пространства и грунта насыпи земляного полотна, качество (включая натяжение, требуемую величину перехлеста и устройство обратных анкеров) и геометрическую точность укладки геосинтетических материалов в строгом соответствии с планом раскатки. Необходимо обеспечить единые высотные отметки всех голов свай, при необходимости дополнить песком до данного высотного уровня и уплотнить грунт межсвайного пространства. Движение строительной техники поверх уложенных геосинтетических материалов запрещено.

Хочется надеяться на дальнейшее развитие данной строительной технологии в нашей стране, а также на появление необходимой нормативной базы для ее грамотного и безболезненного применения в инженерной практике.

Литература:

1. EBGE0. Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen. – Berlin: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., 2010. – 354 с.