

СТУПЕНИ ПРЕОДОЛЕНИЯ

Сложная армогрунтовая система насыпи подхода к эстакаде № 1 на участке автодороги Москва – Санкт-Петербург (Северная рокада) – от Бусиновской развязки до Фестивальной улицы – была запроектирована и построена при научно-техническом сопровождении Филиала ОАО ЦНИИС «НИЦ «Мосты».

1. Цель работы, задачи и методы исследования

Скоростная автомагистраль М-11 «Москва – Санкт-Петербург» – один из наиболее приоритетных проектов транспортного строительства в России за последнее десятилетие. Новая трасса М-11, которая должна «развязать» многие узкие места в автотранспортном сообщении двух российских столиц, отличается невиданными ранее объемами строительно-монтажных работ, большим количеством искусственных сооружений, сложными инженерно-геологическими условиями и крайне плотным графиком строительства.

Транспортная развязка у Фестивальной улицы – одно из сложнейших сооружений на выходе автомагистрали в Москву.

Генподрядчиком этого участка строительства является ОАО «Мостотрест» (главный инженер В.Н. Коротин), генпроектировщиком – ООО «Инженерный центр Мосты и тоннели» (ООО «ИЦ МиТ») (главный инженер А.С. Сафаров, начальник дорожного отдела – Н.Б. Моисеев).

Сложность проектирования и строительства насыпи подхода к транспортной развязке у Фестивальной улицы состояла в том, что инженерно-геологические изыскания, выполненные для разработки проектной документации стадии Р, выявили наличие в основании насыпи прослойки слабых глинистых и суглинистых грунтов мягкопластичной и текучепластичной консистенции. Эти слои слабых грунтов не были обнаружены при инженерно-геологических изысканиях под разработку документации стадии П. Отсыпка насыпи на такое основание привела бы к недопустимым осадкам, что, в свою очередь, сказалось бы на надежности и долговечности дорожной одежды и безопасности движения автотранспорта по скоростной автомагистрали.

Вторая проблема насыпи подхода состояла в стесненных городских условиях ее строительства: насыпь зажата железнодорожными путями с одной стороны и городской улицей с оживленным движением транспорта – с другой. Это не позволило запроектировать насыпь традиционного профиля с откосами.

Оптимальное решение этих непростых вопросов – минимизации осадок слабого основания подходной насыпи и устройства вертикальных откосов с использованием армогрунтовых подпорных стен взамен уголкового железобетонных стен, заложенных в проектную документацию стадии П, – требовало принятия нетрадиционных инновационных решений.

В связи с этим ОАО «Мостотрест» и ООО «ИЦ МиТ» обратились в Филиал ОАО ЦНИИС «НИЦ «Мосты» с предложением о проведении работ по научно-техническому сопровождению

проектных работ стадии Р и строительно-монтажных работ по возведению сложных армогрунтовых систем насыпи подхода к транспортной развязке у Фестивальной улицы.

В работе участвовали:

1. А.Д. Соколов, руководитель работы, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук;
2. Ю.В. Новак, заместитель директора по научной работе НИЦ «Мосты», канд. техн. наук;
3. В.О. Иванов, заведующий лабораторией металлических мостов;
4. А.Н. Солодунин, главный инженер проектов ООО «Союздорпроект»;
5. Н.В. Илюшин, заведующий лабораторией методов расчета мостов, канд. техн. наук;
6. К.Д. Черный, младший научный сотрудник лаборатории металлических мостов, канд. техн. наук;
7. Д.М. Антоновский, инженер;
8. Ю.Б. Плоткин, инженер лаборатории металлических мостов;
9. С.Н. Сухова, инженер лаборатории металлических мостов;
10. Е.А. Свечников, аспирант МАДИ.

1.1. Исследование осадок основания насыпи

На первом этапе работы были выполнены многовариантные расчеты осадок основания насыпи путем моделирования сложного многослойного основания, включающего массивные прослойки слабых грунтов, с помощью моделирования методом конечных элементов.

1.1.1. Расчетная схема

■ Исходные данные

В качестве исходных данных для расчета были использованы данные инженерно-геологических изысканий, проведенных ООО «ДОРГЕО», а также проектные решения насыпи, предоставленные заказчиком.

В соответствии с приведенными исходными данными, в расчетном комплексе Plaxis была построена детализированная конечно-элементная модель участка автодороги от ПК 18+55.00 до ПК 22+31.26.

Задача решалась в плоской постановке, на основе плоскодеформированного (Plane-strain) напряженного состояния грунтового массива; следовательно, геометрическая схема расчетной модели строилась на основе продольного разреза по оси насыпи и соответствующих геологических условий. Общий вид расчетной модели приведен на рис. 1.

Грунтовые материалы введены в модель в виде областей (кластеров), состоящих из элементов, геометрические размеры которых были определены по чертежам. При разработке расчетной модели применялись треугольные 15-узловые конечные

Материал	Модель	γ , кН/м ³	E, МПа	Коэфф. Пуассона (ν)	C, кПА	ϕ , град
1. Насыпной грунт	Mohr-Coulomb	20,0	3000*	0,3	1	35
2. ИГЭ 0спм	Mohr-Coulomb	18,6	5,3	0,36	14	16
3. ИГЭ 0спп	Mohr-Coulomb	19,0	22,0	0,34	23	22
4. ИГЭ 0гг	Mohr-Coulomb	18,2	10,4	0,35	13	17
5. ИГЭ 0вп	Mohr-Coulomb	18,2	15,5	0,35	18	20
6. ИГЭ 2г	Mohr-Coulomb	19,5	11,0	0,35	19	20
7. ИГЭ 9м	Mohr-Coulomb	18,2	4,9	0,36	14	15
8. ИГЭ 9г	Mohr-Coulomb	19,1	6,6	0,36	16	18
9. ИГЭ 10г	Mohr-Coulomb	19,2	9,0	0,35	18	19
10. ИГЭ 11п	Mohr-Coulomb	20,1	27,9	0,33	34	21
11. ИГЭ 12п	Mohr-Coulomb	19,6	12,7	0,35	22	21
12. ИГЭ 12г	Mohr-Coulomb	19,5	10,8	0,35	20	20
13. ИГЭ 40п	Mohr-Coulomb	21,9	22,0	0,32	50	18
14. ИГЭ 42п	Mohr-Coulomb	21,1	28,7	0,31	41	17

Табл. 1. Характеристики грунтов

* – модуль деформации насыпи значительно завышен, чтобы исключить влияние осадки насыпи на отображение распределения осадок в основании.

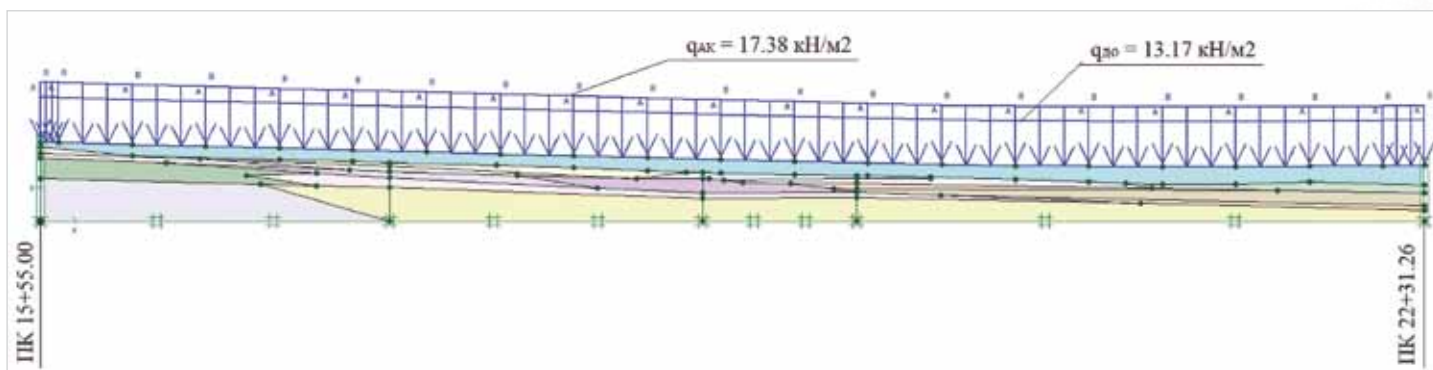


Рис. 1. Расчетная модель

элементы со специфическими параметрами, описывающими работу моделируемого массива грунта. Характеристики грунтов, используемые в расчете, приведены в табл. 1.

■ Нагрузки

В качестве нагрузок в расчете учтены:

- постоянная нагрузка от собственного веса массива грунта и насыпи;
- постоянная нагрузка от собственного веса дорожной одежды;
- временная нормативная нагрузка А-11,5, в соответствии с ГОСТ Р 52748-2007.

Нагрузка от собственного веса массива грунта и насыпи определяется и прикладывается к элементам автоматически, в соответствии с заданными параметрами. Собственный вес дорожной одежды и временная нагрузка включены в модель в качестве внешних нагрузок. Нормативные значения внешних нагрузок приведены на рис. 1 и в табл. 2.

Расчет осадок основания относится к расчетам по второй группе предельных состояний, следовательно, для расчета приняты нормативные значения постоянных и временных нагрузок.

Наименование	Обозначение в модели	Нормативное значение, кН/м ²
1. Собственный вес дорожной одежды	А	13,17
2. А11,5 по ГОСТ Р52748-2007	В	17,38

Табл. 2. Внешние нагрузки

В качестве граничных условий приняты стандартные закрепления, доступные в программе Plaxis. На ПК 18+55.00 и ПК 22+31.26 закрепления запрещают горизонтальные перемещения массива грунта. Снизу закрепления запрещают все перемещения, что создает искусственное ограничение сжимаемой толщи массива грунта, в предположении, что грунты ИГЭ 40п и 42п являются малосжимаемыми. Такие граничные условия в целом соответствуют реальному состоянию рассматриваемого массива грунта.

Расчет в программе Plaxis позволяет моделировать различные этапы (фазы) работы сооружения. Для данной модели

ПК	Осадка основания, см
18+55,00	3,19
19+55,00	5,99
20+55,00	6,03
21+55,00	8,77
22+31,26	10,14

Табл. 3. Значения осадок основания

было определено напряженно-деформированное состояние системы для трех этапов работы сооружения:

- 1 – гравитационное нагружение, определяющее напряженно-деформированное состояние грунтового массива в естественном состоянии (до возведения насыпи);
- 2 – отсыпка насыпи, начальные перемещения в массиве грунта обнуляются;
- 3 – устройство дорожной одежды и загрузка временной нагрузкой.

Расчет произведен на эффективные напряжения, без учета порового давления в массиве грунта. Такой подход позволяет получить напряженно-деформированное состояние при максимальном рассеивании порового давления (полной консолидации грунтового массива).

1.1.2. Результаты расчета

В результате проведенных расчетов было получено напряженно-деформированное состояние основания насыпи, что позволяет оценить величину осадок основания в период эксплуатации сооружения. Распределение вертикальных перемещений в сечении по подошве насыпи приведено на рис. 2. Значения осадок основания в некоторых точках приведены в табл. 3.

На основании результатов, проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- вертикальные перемещения (осадки) основания насыпи на данном участке превышают 2 см;
- расчет произведен на эффективные напряжения, что отражает состояние грунтового массива при полной консолидации; следовательно, полученные величины вертикальных перемещений (осадок) являются максимально возможными при данных условиях.

В целом по результатам приведенных расчетов можно судить о том, что при возведении насыпи и ее загрузке эксплуатационной нагрузкой возможны значительные осадки основания насыпи (до 10,14 см), что связано с залеганием на данном участке – в основании насыпи – грунтов, имеющих высокую деформативность и недостаточную несущую способность. В связи с этим рекомендовано предусмотреть мероприятия по повышению несущей способности основания насыпи – для минимизации осадок и обеспечения нормальной эксплуатации сооружения.

2. Методы усиления слабого основания насыпи

Расчеты осадок, выполненные различными методами, показали, что величины осадок насыпи подхода недопустимо велики для условий эксплуатации дорожной одежды.

Расчеты консолидации грунтов и развития осадок насыпи во времени показывают, что скорость осадок, допустимая для укладки асфальта (не более 2 см/год), не соблюдается для ряда сечений. Вместе с тем график строительства и сроки ввода сооружения в эксплуатацию не позволяют выдерживать необходимое время для стабилизации осадок.

2.1. Замена слабых грунтов основания

Слабые грунты (ИГЭ 9м) располагаются на достаточно большой глубине (до 5,6 м), при этом горизонт грунтовых вод располагается внутри толщи слабых грунтов. Вследствие этого замена слабого грунта технологически трудно осуществима.

2.2. Цементация слабых грунтов основания

Слабые грунты (ИГЭ 9м) – мягкопластичные суглинки, обводненные, имеющие низкий коэффициент фильтрации (по справочным данным). Вследствие этих причин цементация этих грунтов невозможна.

2.3. Устройство щебеночных свай

Щебеночные сваи устраиваются по технологии буровых свай в обсадной трубе. Скважина заполняется уплотняемым щебнем. Эти сваи ускоряют консолидацию грунтов, обеспечивая вертикальный дренаж, и частично перераспределяют нагрузки от веса насыпи между сваями и межсвайным пространством. Последний фактор сказывается незначительно на величинах осадок. Кроме этого, укрепление основания щебеночными сваями очень трудоемко и затратно.

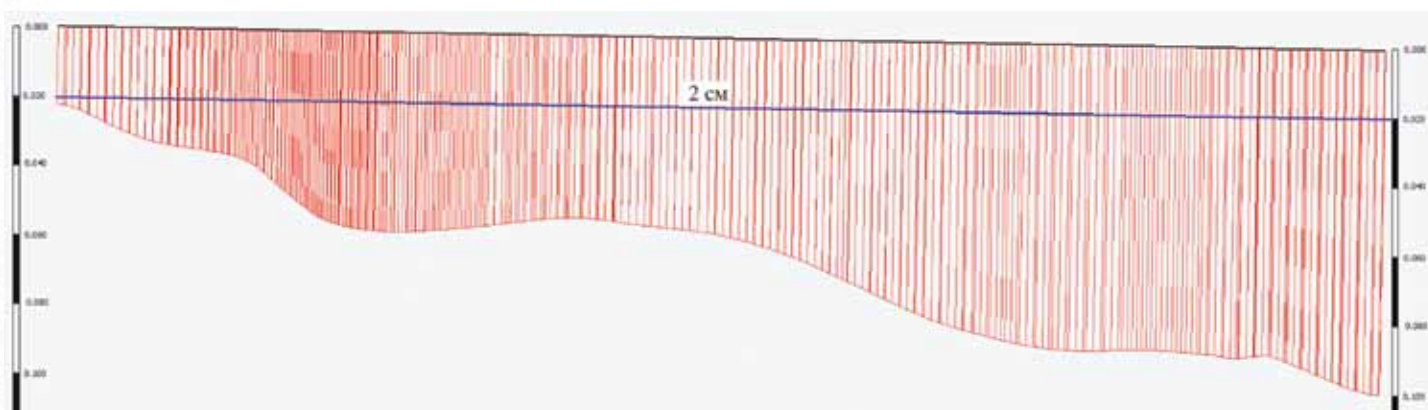


Рис. 2. Вертикальные перемещения в сечении по подошве насыпи на участке от ПК 18+55,00 до ПК 22+31,26

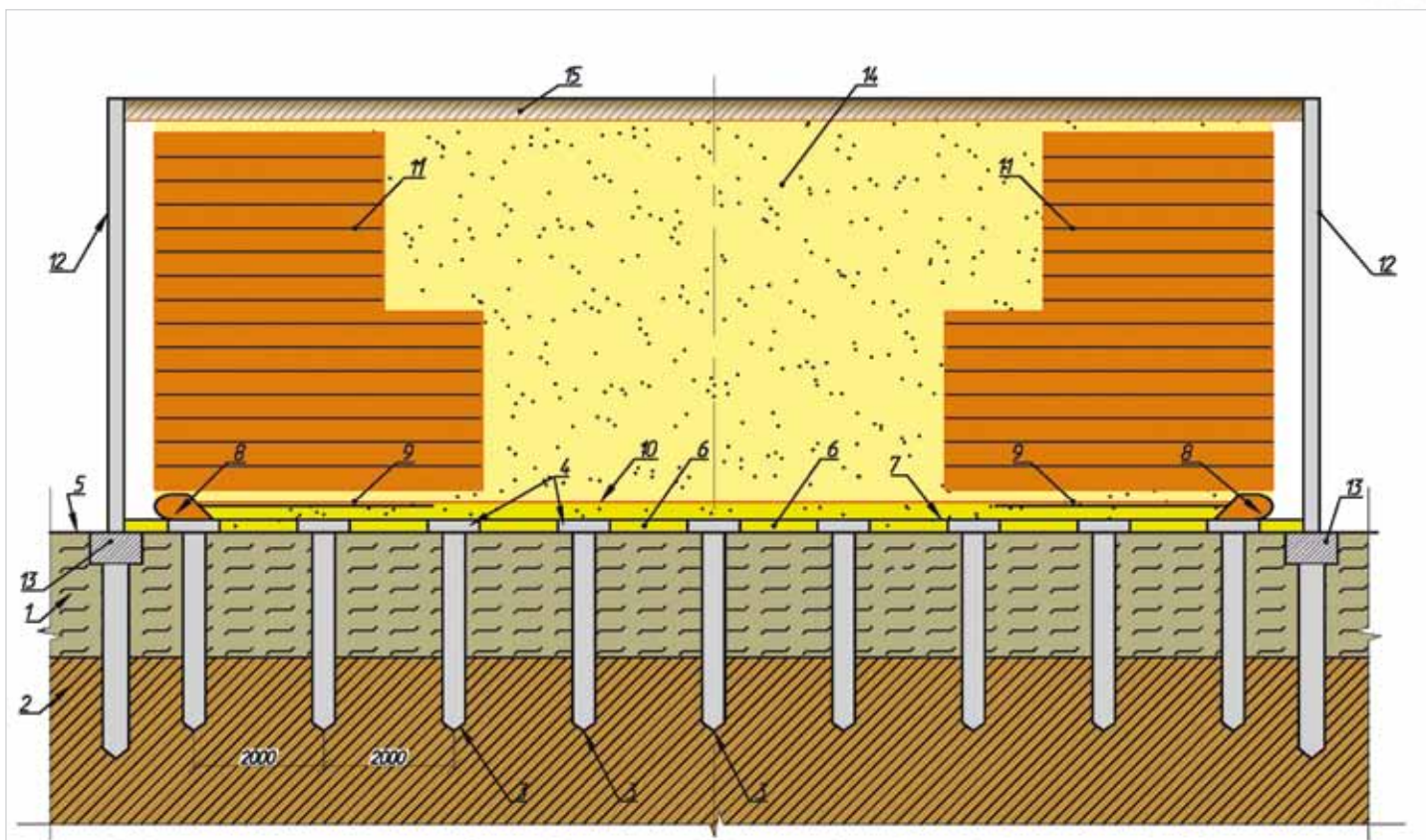


Рис. 3. Принципиальная схема усиления слабого основания насыпи подхода к эстакаде № 1 и устройства армогрунтовых подпорных стен насыпи: 1 – слабые грунты основания; 2 – прочные грунты основания; 3 – забивные сваи; 4 – оголовники свай; 5 – поверхность планировки земли; 6 – заполнение межсвайного пространства уплотняемым песком; 7 – поперечный слой мембраны из высокопрочной геосинтетической ткани; 8 – упорно-щебеночная призма; 9 – обратный анкер; 10 – продольный слой мембраны из высокопрочной геосинтетической ткани; 11 – армогрунтовые системы низовых подпорных стен насыпи; 12 – монолитные железобетонные лицевые стенки; 13 – фундаменты лицевых стенок; 14 – тело насыпи; 15 – дорожная одежда

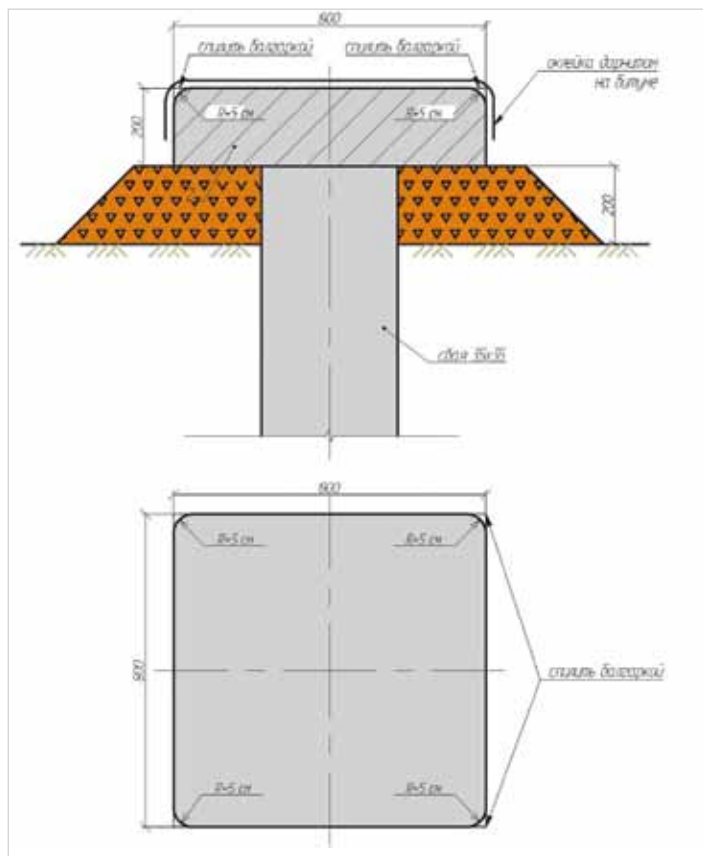


Рис. 4. Обработка оголовников свай

2.4. Устройство грунтоцементных свай

Устройство этих свай крайне затратно по расходу цемента; эти сваи не могут устраиваться на значительную глубину, как этого требуют расчеты; грунтоцементные сваи имеют очень низкую несущую способность и совсем не воспринимают горизонтальных нагрузок, которые при загрузке основания весом подходной насыпи и временными нагрузками непременно возникают в грунте основания.

2.5. Устройство безосадочной насыпи на свайном поле с гибким геосинтетическим ростверком

Последний вариант признан совместно с проектировщиками (ООО «ИЦ МиТ») наиболее приемлемым по стоимости, срокам строительства и, что самое главное, по надежности этого конструктивно-технологического решения.

Технология усиления слабых оснований с помощью свайного поля и гибкого ростверка заимствована в России из зарубежного опыта транспортного строительства, где насыпи на свайном поле с гибким ростверком называют «безосадочными» или «висячими» насыпями.

Эта технология уже многократно была применена в России, что позволило накопить достаточный опыт в проектировании и строительстве таких конструкций.

2.5.1. Параметры армогрунтовой системы усиления слабого основания насыпи

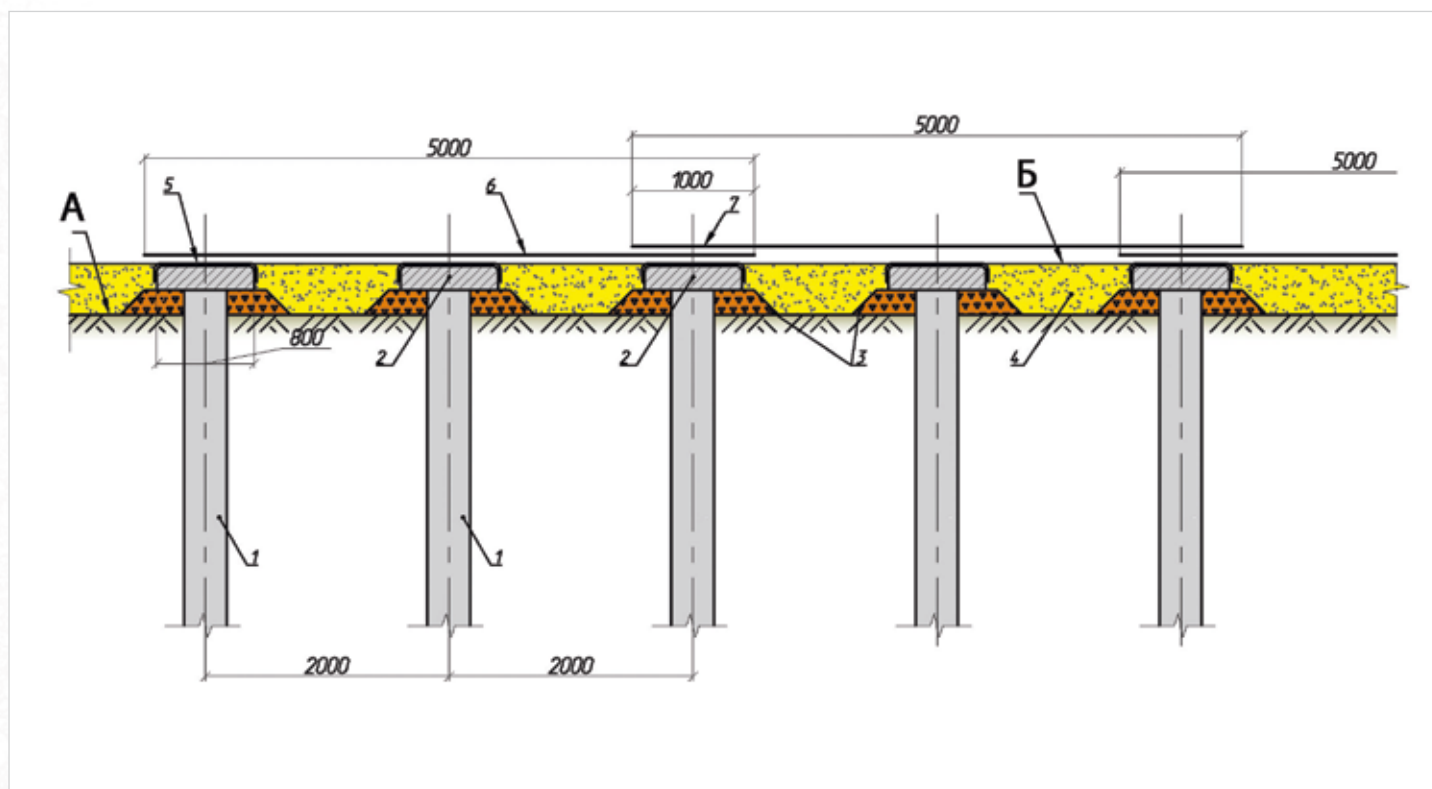


Рис. 5. Схема подготовки поверхности под раскладку нижнего поперечного слоя мембраны из геосинтетики:

А - поверхность планировки земли, Б - поверхность под раскладку геотекстиля

1 – забивные сваи; 2 – оголовники свай; 3 – щебеночные подушки под оголовники; 4 – заполнение межсвайного пространства уплотняемым песком; 5 – оклейка оголовников дорнитом на битуме; 6 – поперечные полотна геосинтетики; 7 – стыки полотен геосинтетики над оголовниками свай

Параметры этой армогрунтовой системы назначены из условий минимизации расходов:

- увеличение шага свай уменьшает их количество, но увеличивает требуемую несущую способность;
- с увеличением шага свай увеличивается просвет между оголовниками, что требует увеличения прочности геосинтетиче-

После сравнения результатов расчетов был принят вариант, приведенный на рис. 3.

2.5.2. Конструкция усиления слабого основания насыпи

Конструкция усиления слабого основания (или «висячей» насыпи) состоит из следующих конструктивных элементов (рис. 3).

- забивные призматические сваи 3 сечением 35×35 см, забиваемые в плане с шагом 2,0×2,0 м; сваи должны быть забиты сквозь слабые грунты основания 1 под расчетную нагрузку до расчетного отказа и погружены в прочные 2 (полутвердые) грунты основания;
- сваи снабжаются монолитными железобетонными оголовниками 4, связанными с арматурными выпусками каркасов свай;
- межсвайное пространство 6 заполняется уплотненным песком;
- поперечный слой мембраны 7 из высокопрочной геосинтетической ткани расстилается поверх подготовленной поверхности и оголовников, обклеенных дорнитом на битуме;
- по концам полотен поперечного слоя мембраны 7 устраиваются упорно-щебеночные призмы 8 и обратный анкер 9.

Обклейка железобетонных оголовников дорнитом на битуме необходима для защиты геосинтетической ткани из полиэсте-

ра, который разрушается (теряет часть своей прочности) от контакта со щелочной средой бетона. Деталь этой обработки оголовников свай показана на рис. 4.

Полосы раскладываются с нахлестом 100 см. Нахлест должен осуществляться над оголовниками свай (рис. 5). Конструкция упорно-щебеночной призмы и обратного анкера, длина которого определяется расчетом, показана на рис. 6.

3. Расчет осадок насыпи с учетом усиления основания

3.1. Расчетная схема

Конструктивные элементы (сваи, оголовники) моделировались элементами типа Beam. Для моделирования работы геосинтетиче- в программе Plaxis предусмотрены элементы типа Geogrid, особенностью которых является работа только на растяжение.

В качестве нагрузок в расчете учтены:

- постоянная нагрузка от собственного веса массива грунта, основания, грунта насыпи и конструктивных элементов;
- постоянная нагрузка от собственного веса дорожной одежды;
- временная нормативная нагрузка НК, в соответствии с ГОСТ Р 52748-2007; класс нагрузки К = 8,3.

Расчет осадок основания относится к расчетам по второй группе предельных состояний, однако в данном случае производится оценка эффективности технического решения по повышению несущей способности основания и дополнительная проверка несущей способности свай; следовательно, данный расчет следует производить по первой группе предельных состояний на расчетные нагрузки.

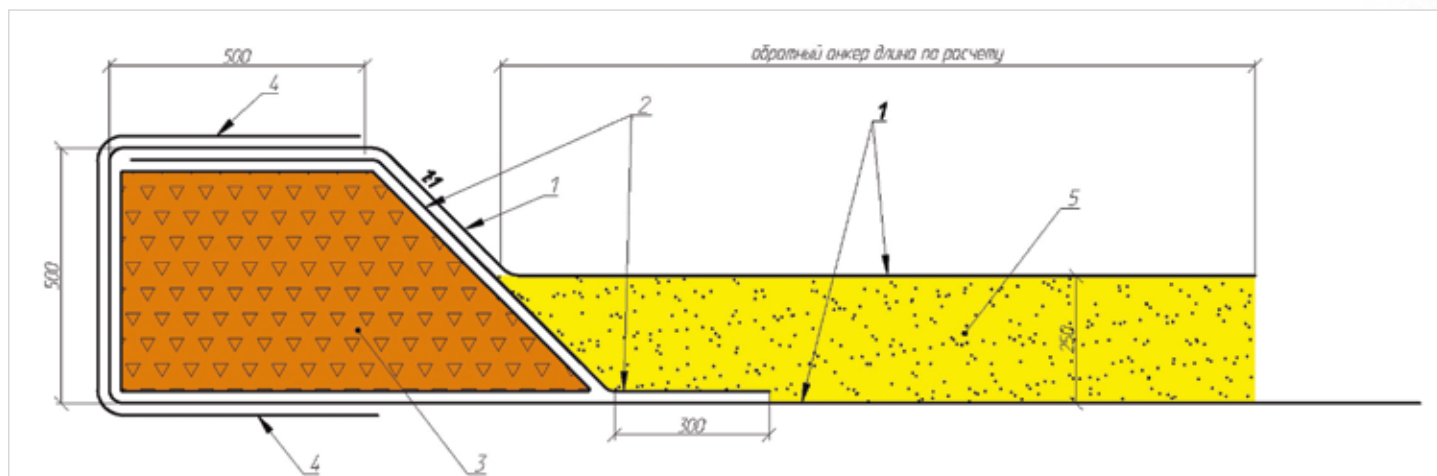


Рис. 6. Конструкция упорно-щебеночной призмы и обратного анкера: 1– геосинтетика; 2– нетканый разделительный материал Тураг CF 40; 3 – щебеночная призма; 4 – защитный слой дорнита; 5 – уплотняемый песок

Наименование	Обозначение в модели	Нормативное значение, кН/м ²	Расчетное значение, кН/м ²
1. Собственный вес дорожной одежды	A	13,1	17,38
2. Н8,3 по ГОСТ Р 52748-2007	B	44,93	49,43

Табл. 4. Внешние нагрузки

3.2. Результаты расчета

Результаты расчета приведены на рис. 7б, а величины осадок – в табл. 5.

4. Выбор материалов для возведения армогрунтовых систем

4.1. Выбор геосинтетики

4.1.1. Первоначально в расчеты и проектную документацию была заложена геосинтетическая ткань Stablenka, производимая фирмой Huesker Synthetik (Германия).

ПК	Осадка основания, см
18+55,00	1,55
19+55,00	1,85
20+55,00	1,54
21+55,00	1,65
22+31,26	1,59

Табл. 5. Значения осадок основания

Для устройства гибкого ростверка были приняты:

- поперечный слой – Stablenka 1000/100;
- продольный слой – Stablenka 400/50.

4.1.2. Субподрядная строительная фирма, которая должна была возводить насыпь подхода к эстакаде № 1 с армогрунтовыми системами, ООО «АльмакорГруп» (генеральный директор А.В. Афонский), провела выбор поставщика геосинтетики на конкурсной основе. В результате этого была выбрана российская фирма «Миакор», производящая аналогичный немецкой

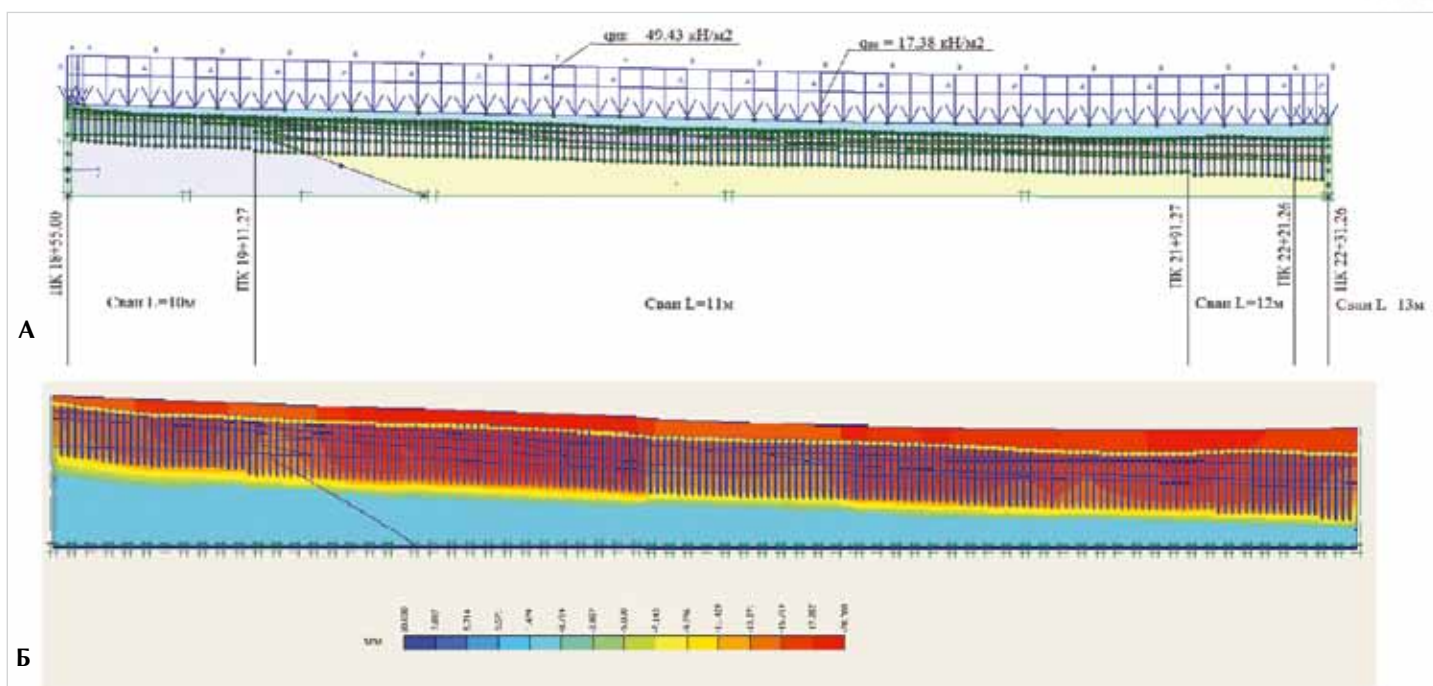


Рис. 7. А – расчетная модель, Б – распределение вертикальных перемещений в модели. Вертикальные перемещения не превышают 20 мм

Stabilenka геосинтетический материал «Армостаб» из того же сырья – полиэстера. Цена на этот материал оказалась ниже за счет отсутствия таможенных сборов. Так произошло импортозамещение зарубежной продукции отечественной, что стало особенно актуально в сегодняшней геополитической обстановке.

НИЦ «Мосты» ОАО ЦНИИС было поручено произвести перерасчеты армогрунтовых систем с учетом использования отечественного материала фирмы «Миакон», который в итоге и был использован при строительстве объекта по согласованию с генпроектировщиком ООО «ИЦ МиТ».

4.1.3. Разделительный материал

При устройстве упорно-щебеночных призм используется разделительный фильтрующий материал (нетканый) для отделения щебня от песка и предотвращения проникновения песчаных мелких частиц в поры щебня.

Для этой цели в проект заложен нетканый разделительный фильтрующий материал Тураг марки не ниже CF40.

4.1.4. Защитный материал

В качестве защитного материала в проекте рекомендован дорнит. Он необходим для обклейки на битуме оголовников свай, что предотвращает контакт геосинтетики из полиэстера со щелочной средой бетона (полиэстер разрушается от контактов со щелочной средой).

Дорнит также необходимо применять для защиты внешних поверхностей упорно-щебеночных призм при устройстве армогрунтовых систем усиления основания и низовых подпорных стен насыпи подхода к эстакаде № 1.

Дорнит выпускается многими предприятиями; специальных требований к этому материалу проект не предъявляет.

4.2. Требования к грунтам для формирования армогрунтовой системы

4.2.1. Песок

Для формирования армогрунтовых систем усиления основания и низовых армогрунтовых подпорных стен насыпи необходимо применить песок со следующими характеристиками:

Нормативный удельный вес $\gamma_n = 1,8 \text{ тс/м}^3$;

Нормативный угол внутреннего трения $\phi_n = 35^\circ$;

Удельное сцепление $C \approx 0$;

Песок средней крупности, неоднородный;

Коэффициент фильтрации $K_f \geq 2,0 \text{ м/сут}$;

Содержание глинистых и пылеватых частиц $< 0,5\%$;

Содержание органических примесей $< 0,1\%$;

*после уплотнения

Пояснение:

Грунты, рекомендуемые нормами для отсыпки земполотна автомобильных дорог (суглинки, супеси, пески пылеватые непучинистые), непригодны для обеспечения расчетной работы армогрунтовых систем.

Пылеватые пески, супеси и суглинки имеют, как правило, угол внутреннего трения $\phi < 15^\circ$. При этих величинах ϕ невоз-

можно обеспечить расчетную работу мембраны усиления основания и прослоек армогрунтовых систем подпорных стен.

4.2.2. Щебень

Для формирования упорно-щебеночных призм по концам полотнищ мембраны необходим щебень твердых горных пород фракций $20 \div 40 \text{ мм}$ и $5 \div 10 \text{ мм}$ для отсыпки слоями с уплотнением методом заклинки.

5. Низовые подпорные стены насыпи подхода к эстакаде № 1

В проектной документации стадии П были предусмотрены железобетонные подпорные стены уголкового профиля без контрфорсов на естественном основании. Этот вариант был признан неприемлемым не только по причине его затратности, но и в связи с тем, что уголкового подпорные стены на естественном основании уже неоднократно приводили к авариям (Загорская ГАЭС) или повреждениям при опирании на нескальные податливые грунты.

В связи с этим генподрядчиком (ОАО «Мостотрест») и генпроектировщиком (ООО «ИЦ МиТ») по рекомендации НИЦ «Мосты» ОАО ЦНИИС было принято решение об устройстве армогрунтовых низовых подпорных стен насыпи (рис. 3).

5.1. Методика расчета

Армогрунтовые системы подпорных стен насыпи были рассчитаны по методике, разработанной в НИЦ «Мосты» ОАО ЦНИИС А.Д. Соколовым и подробно изложенной в его монографии «Армогрунтовые системы автодорожных мостов и транспортных развязок», изданной в 2013 году в Санкт-Петербурге отраслевой медиа-корпорацией «Держава».

Особенностями этой методики, изложенной во II главе книги «Основы строительной механики армогрунтовых систем», являются следующие важнейшие факторы:

- методика полностью ориентирована на российские нормативные документы;

- впервые в научной практике по строительству проведено разделение армогрунтовых систем на статически определимые и статически неопределимые, что крайне важно для надежности результатов расчета и адекватности расчетной схемы и реальной конструкции;

- вывод всех расчетных формул основан на развитии теории Кулона о давлении грунтов на подпорные сооружения, которая до сих пор лежит в основе соответствующих разделов российских норм проектирования, путем введения нескольких дополнительных предпосылок;

- использованная в расчетах система коэффициентов надежности полностью соответствует российским нормам по мостостроению;

- рассмотрены не только тривиальные решения вертикальной стенки с горизонтальной засыпкой, но и общие случаи, включая загрузку поверхности грунта различными временными нагрузками, сейсмике, наклонное армирование, приведено много примеров расчета;

- расчеты армогрунтовых систем по методике А.Д. Соколова не требуют специальных программных средств;

- методика использована при проектировании и строительстве многих сооружений транспортной инфраструктуры России, которые благополучно эксплуатируются уже многие годы.

В книге приведено много примеров запроектированных и построенных объектов транспортной инфраструктуры, иллюстрированных большим количеством фотографий из фотоархива А.Д. Соколова.

Приведены рекомендации по технологии строительства; экономическое сравнение вариантов традиционных конструкций с армогрунтовыми, данные по характеристикам отдельных геосинтетических материалов.

В книге содержится также обзор зарубежных методик и технологий.

5.1.1. Эпюра интенсивности условно распределенного усилия в армирующих прослойках

Эта эпюра аналогична эпюре интенсивности активного давления грунта на подпорную стену, определяемого по формуле:

$$p_a = \lambda_a \cdot \gamma \cdot h \quad (1)$$

где λ_a – коэффициент активного давления грунта, определяемый в простейшем случае по формуле:

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

В армогрунтовой системе активное давление грунта на стену должно быть воспринято усилиями в армирующих прослойках S_i , где i – номер армирующей прослойки.

Таким образом, распределенное активное давление грунта воспринимается системой сил $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n$, которая, в свою очередь, может быть заменена эпюрой условно распределенного усилия в армирующих прослойках, определяемого в общем случае по формуле:

$$p_s = \lambda_a \cdot \gamma \cdot h \quad (3)$$

где p_s – интенсивность условно распределенного усилия в армирующих прослойках;

λ_a – коэффициент условно распределенного усилия в армирующих прослойках, определяемый в общем случае по формуле:

$$\lambda_a = \left[\frac{\cos(\varphi + \varepsilon)}{\cos \varepsilon \cdot \cos \beta \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varepsilon - \beta) \cdot \sin(\varphi - \alpha)}{\cos \beta \cdot \cos(\varepsilon + \alpha)}} \right)} \right]^2 \cdot \cos \beta \quad (4)$$

φ – угол внутреннего трения грунта;

ε – угол наклона к вертикали напорной поверхности;

α – угол наклона к горизонтали поверхности засыпки;

β – угол наклона к горизонтали армирующих прослоек.

5.1.2. Эпюра материалов

Эпюра материалов – это также новое понятие, введенное А.Д. Соколовым в практику проектирования армогрунтовых систем.

Если эпюру условно распределенного усилия в армирующих прослойках «разбросать» по узлам, совпадающим с армирующими прослойками, то вместо треугольной или трапециевидальной эпюры получим ступенчатую эпюру, каждая ордината которой будет соответствовать усилию в i -ой прослойке.

Далее находим проектные прочности различных марок принятого армирующего материала, определяемые по формуле:

$$S_{пр} = \frac{S_{раз}}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \gamma_f}, \quad (5)$$

где $S_{пр}$ – проектная прочность материала;

$S_{раз}$ – разрывная предельная прочность материала или его марка; $A_1, A_2, \dots, A_5$ – понижающие коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов на прочность геосинтетики, такие как:

- ползучесть;
- агрессивная среда и микроорганизмы, ультрафиолет;
- повреждения при транспортировке и укладке материала;
- наличие стыков;
- учет сейсмики, взрывов и динамики;

γ_f – коэффициент надежности по материалу, принимаемый равным 1,75 по рекомендации европейских норм. Затем строится ступенчатая эпюра материалов, каждая ордината которой соответствует принимаемой прочности материала. По вертикали ступени эпюры должны совпадать с расположением армирующих прослоек.

В целях унификации конструкции рекомендуется принимать не более трех ступеней. В данной конструкции их принято две: нижние слои из материала «Армостаб 400/50», верхние слои из материала «Армостаб 300/50».

5.1.3. Длина заземления армирующих прослоек в неподвижный массив грунта

Неподвижной частью грунта является грунт насыпи за пределами призмы обрушения.

Угол наклона к горизонтали плоскости обрушения θ при $\alpha = \delta = \varepsilon = \beta = 0$ и сплошной равномерно распределенной вертикальной нагрузке на поверхности грунта определяется по формуле:

$$\theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}, \text{ где } \varphi = \varphi_n = 35^\circ;$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{35^\circ}{2} = 62,5^\circ; \operatorname{tg} \theta = 1,921.$$

Длину заделки армирующих прослоек за пределы призмы обрушения следует находить из условия равнопрочности армирующего материала на растяжение и выдергивание из неподвижной части грунта, которое определяется уравнением:

$$S_i^{\text{проект}} = 2 \cdot l_i \operatorname{tg} \varphi_n \cdot K_{сн} (\gamma_n \cdot \gamma_{fy}^{\min} \cdot h_i + \Sigma q_i \cdot \gamma_{fq}^{\min}), \quad (6)$$

где $S_i^{\text{проект}}$ – проектная долговременная прочность геосинтетического армирующего материала;

l_i – длина заделки i -го слоя геосинтетики в неподвижный массив грунта;

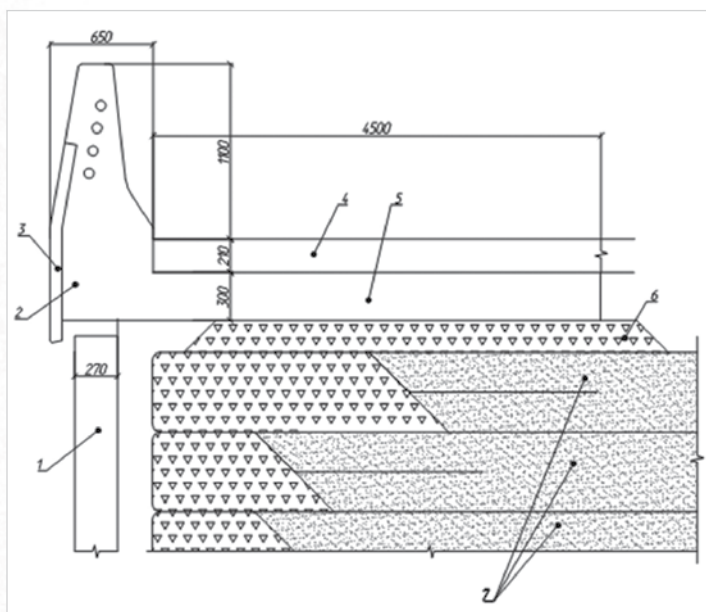


Рис. 8. Схема опоры ж/б блока парапетного ограждения на армогрунтовую систему подпорной стены, предложенная заказчиком:

- 1 – ж/б монолитная лицевая стенка;
- 2 – ж/б блок парапетного ограждения;
- 2 – фибробетонная плита;
- 4 – дорожное покрытие;
- 5 – ж/б плита опоры блока барьерного ограждения на армогрунт;
- 6 – щебеночная призма;
- 7 – армогрунтовая система подпорной стены

φ_n – нормативный угол внутреннего трения грунта засыпки, равный 35° ;

$K_{сн}$ – коэффициент снижения трения песка по геосинтетике, принимаемый равным 0,7;

γ_n – нормативное значение удельного веса грунта засыпки, равное $1,8 \text{ тс/м}^3$;

$\gamma_{fy}^{\min}$ – минимальное значение коэффициента надежности к весу грунта, равное 0,9;

h_i – заглубление i -ой прослойки в грунт;

$\gamma_{fq}^{\min}$ – минимальное значение коэффициента надежности к нагрузке q , равное 0,8.

Из уравнения равнопрочности определяется l_i по формуле:

$$l_i = \frac{S_i^{\text{проект}}}{2 \cdot \text{tg}35 \cdot 0,7(1,8 \cdot 0,9 \cdot h_i + q \cdot 0,8)} = \frac{S_i^{\text{проект}}}{15,89h_i + 0,78q}$$

Найденные теоретические длины заземления прибавляются к размеру призмы обрушения на уровне i -ой прослойки, и получаемая величина округляется с точностью до 0,5 м.

5.1.4. Устойчивость армогрунтовой системы

В зарубежной литературе и нормативах по проектированию сооружений из армированного грунта фигурируют, как правило, два понятия:

- внутренняя устойчивость;
- внешняя устойчивость.

По мнению авторов, которое изложено в вышеупомянутой монографии, такие термины противоречат фундаменталь-

ным положениям строительной механики. В строительной механике приняты два вида потери устойчивости:

- потеря устойчивости положения на сдвиг или опрокидывание;
- потеря устойчивости формы.

Таким образом, под термином «внутренняя» устойчивость, очевидно, предполагается не устойчивость, а прочность армирующих элементов на разрыв и достаточность их заземления в неподвижном массиве грунта.

Методика таких расчетов приведена выше. Что же касается устойчивости положения, то такие расчеты необходимо выполнять по известным и предусмотренным российскими нормами методам расчета:

- устойчивость на плоский сдвиг всей системы по основанию;
- устойчивость на плоский сдвиг отдельных частей конструкции;
- устойчивость всего сооружения на сдвиг по круглоцилиндрической или иной опасной поверхности скольжения.

Устойчивость на опрокидывание обычно проводится относительно переднего нижнего ребра всей конструкции или ее частей.

Вся указанная выше группа расчетов была проведена для пяти поперечных сечений армогрунтовой системы подпорной стены насыпи с шагом по высоте конструкции 1,0 м.

6. Конструкция лицевой стенки армогрунтовых систем

При проектировании армогрунтовых подпорных стен насыпи подхода к эстакаде № 1 было принято решение устроить подпорные стены статически определимыми. В этих конструкциях армогрунтовая система не связана с лицевой (облицовочной, декоративной) стенкой. Лицевая стенка запроектирована в монолитном железобетоне и имеет толщину 270 мм при предельной высоте в соответствии с отметками насыпи.

Между лицевой стенкой и армогрунтовой системой обеспечен зазор 220 мм с целью:

- не допустить контакта геосинтетики с бетоном;
- не допустить силового воздействия армогрунтовой системы на лицевую стенку; при этом она будет рассчитана только на восприятие собственного веса.

7. Конструкция опоры железобетонных блоков парапетного ограждения с помощью анкерной плиты на армогрунт

Конструктивное решение опоры парапетного ограждения (рис. 8) разработано в соответствии с представленным заказчиком (ООО «ИЦ МиТ») эскизом и согласованным с главным инженером ООО «ИЦ МиТ» А.С. Сафаровым конструктивным устройством анкерной плиты опоры блока парапетного ограждения, состоящим из типового блока железобетонного парапетного ограждения и анкерной плиты, заглубленной в грунт (что создает необходимый уравновешивающий момент).

8. Строительно-монтажные работы по возведению армогрунтовых систем насыпи

8.1. Руководство строительством транспортной развязки у Фестивальной улицы

Для комплексного управления всем процессом строительства ОАО «Мостотрест» создан штаб стройки «Комплексное управление проектом «Фестивальная» (КУП) во главе с управляющим В.В. Фабером. В КУП поступает вся проектная документация, здесь же осуществляется руководство работой многих субподрядных строительных организаций, проводятся еженедельные совещания всех участников строительства с отчетом о выполнении графика строительства, с заданиями на ближайшую неделю. Протоколы совещаний еженедельно рассылаются всем участникам стройки. От ОАО «Мостотрест» стройку курирует заместитель генерального директора Е.Н. Бирюков.

8.2. Технологические регламенты на производство и контроль качества работ и материалов при устройстве армогрунтовых систем насыпи подхода к эстакаде № 1

Технологические регламенты разрабатывались в НИЦ «Мосты» ОАО ЦНИИС с привлечением на субподряде ООО «Сюздорпроект» (ГИП А.Н. Солодунин).



Рис. 9. Панорама строительства насыпи подхода к эстакаде № 1 транспортной развязки у Фестивальной улицы



Рис. 10. Участок насыпи подхода к эстакаде № 1 транспортной развязки у Фестивальной улицы

Субподрядной строительной организацией по возведению насыпи подхода к транспортной развязке было выбрано ООО «АльмакорГруп».

Технологический регламент состоит из трех частей:

- I часть – армогрунтовая система усиления основания насыпи;
- II часть – армогрунтовая система подпорных стен насыпи;
- III часть – дополнение к частям I и II по замечаниям проектировщиков и строителей.

Все части технологического регламента согласовали:

- генеральный директор ООО «АльмакорГруп» А.В. Афонский;
- начальник дорожного отдела ООО «ИЦ МиТ» Н.Б. Моисеев;
- главный инженер ООО «ИЦ МиТ» А.С. Сафаров;
- управляющий проектом КУП «Фестивальная» В.В. Фабер;
- начальник управления подготовки строительства ОАО «Мостотрест» А.А. Конных.

Технологические регламенты утверждены главным инженером ОАО «Мостотрест» В.Н. Коротыным.

8.3. Научно-техническое сопровождение и контроль качества строительно-монтажных работ

Панорама строительства насыпи подхода показана на рис. 9, а участок насыпи подхода к устью эстакады № 1 – на рис. 10.

Научно-техническое сопровождение и контроль качества СМР по возведению армогрунтовых систем насыпи подхода к транспортной развязке у Фестивальной улицы осуществляется группой сотрудников Филиала ОАО ЦНИИС «НИЦ «Мосты» во главе с руководителем темы – А.Д. Соколовым. Не реже двух раз в неделю на протяжении всего строительного периода производились инспекционные осмотры строительства сооружения, фиксировались обнаруженные при этом недостатки, давались указания по их устранению. Все замечания и рекомендации фиксировались в журнале научно-технического сопровождения и контроля качества СМР. Контроль качества включал:

- входящий контроль качества геосинтетических материалов и условий их складирования; контроль качества завозимых



Рис. 11. Забивные сваи 35х35 см для усиления слабого основания насыпи. Некоторые сваи ошибочно забиты под углом к оси створа



Рис. 12. Арматурные каркасы оголовников забивных свай



Рис. 13. Забетонированные в зимнее время оголовники забивных свай



Рис. 14. Оклеенные дорнитом оголовники свай



Рис. 15. Проведение инструктажа с инженерно-техническим персоналом ООО «АльмакорГрупп» по Технологическому регламенту



Рис. 16. Инспекционный контроль СМР на участке строительства насыпи. Зав. лаб. металлических мостов В.О. Иванов и вед. науч. сотр. НИЦ «Мосты» А.Д. Соколов



Рис. 17. Участок насыпи, усиленный забивными сваями с оголовниками под расстилку геосинтетики

грунтовых материалов с определением их физико-механических характеристик, указанных в технологическом регламенте. Эти лабораторные испытания проводились специалистами грунтовой лаборатории МАДИ;

■ пооперационный контроль (состоял в проверке качества завозимого песка с повторным определением характеристик на

каждую новую партию песка); контроль качества выполнения отдельных этапов СМР; контроль уплотнения песка; коэффициент уплотнения песка определялся с помощью пенетрометра «СоюзДорНИИ» и отбора проб с помощью режущих колец; качество и правильность укладки геосинтетических материалов, их крепления, устройства упорно-щебеночных призм и других деталей конструкции.



Рис. 18. Подача песка насыпи погрузчиком



Рис. 19. Уплотнение песка виброкатком до коэффициента уплотнения $K_{упл} \geq 0,98$ по кривой стандартного уплотнения



Рис. 20. Послойное уплотнение щебеночной призмы виброплитой



Рис. 21. Щебеночная призма отсыпается слоями из двух фракций гранитного щебня с уплотнением методом заклинки

■ приемочный контроль (состоял в подтверждении правильности и качества СМР на каждом выполненном участке строительства насыпи).

8.4. Этапы строительно-монтажных работ по возведению армогрунтовых систем насыпи подхода к развязке у Фестивальной улицы.

8.4.1. Свайное поле

Забивка свай 35×35 см с шагом 2,0 м была начата в зимнее время 2014 года (рис. 11). Забивные сваи снабжались железобетонными оголовниками размером 80×80 см. Арматурные каркасы оголовников показаны на рис. 12. Бетонирование оголовников и их обклейка дорнитом также были произведены в зимне-весенний период (рис. 13, 14). Из рис. 11 видно, что часть свай забита под углом 45° к оси трассы, что не соответствует расчетной схеме. Также под углом 45° к оси насыпи были забетонированы и оголовники свай на небольших участках. Это неизбежно привело бы к разрывам геосинтетики гибкого ростверка. НИЦ «Мосты» были даны рекомендации об исключении этого недостатка СМР.

8.4.2. Гибкий ростверк

Строительство армогрунтовых систем насыпи было решено (совместно с проектировщиками и строителями) провести в теплое время года, так как отсыпка армогрунтовых систем в зимнее время была сопряжена с целым рядом труднопреодолимых препятствий, таких как защита поля от

снега и транспортировка песка в укрытом автотранспорте. Кроме того, попадание смерзшихся комьев грунта, льда и снега в армогрунтовую систему неизбежно привело бы к ее осадкам в теплое время года.

После утверждения технологического регламента был проведен подробный инструктаж инженерно-технического персонала ОАО «АльмакорГруп» по выполнению требований технологического регламента (рис. 15), а соблюдение этих требований контролировалось сотрудниками НИЦ «Мосты» не реже двух раз в неделю (рис. 16).

Гибкий ростверк из геосинтетики российской фирмы «Миакор» состоял из поперечных слоев «Армостаб 600/100» в два слоя, укладываемых с перехлестами и вразбежку. Продольный слой укладывается вдоль оси насыпи и выполняется из геосинтетики «Армостаб 400/50». Нахлесты должны осуществляться над оголовниками свай.

Расстилка геосинтетики гибкого ростверка должна осуществляться на идеальную поверхность поля. Межсвайное пространство должно быть выровнено и заполнено уплотненным песком (рис. 17). Подача песка осуществлялась автопогрузчиком (рис. 18), а уплотнение до $K_{упл} \geq 0,98$ выполнялось виброкатком (рис. 19).

По концам полотнищ гибкого ростверка устраивались упорно-щебеночные призмы, конструкция которых показана на



Рис. 22. Установка опалубочного щита с зазором до лицевой стенки 22 см



Рис. 23. Щебеночная призма отделяется от песка разделительным материалом Турар CF 40



Рис. 25. Укладка поперечного слоя геосинтетики Армогат 600/100. Длина 50 м подобрана расчетом для безотходного использования рулона

рис. 6. Призмы отсыпались слоями из крупных и мелких фракций гранитного щебня, уплотняемого виброплитами методом заклики (рис. 20, 21). Между торцевой поверхностью армогрунтовой системы и лицевой стенкой должен быть обеспечен зазор 220 мм, что обеспечивалось с помощью опалубочных щитов (рис. 22). Щебеночная призма отделяется от песка разделительным фильтрующим материалом Турар CF 40 (рис. 23). Обеспечение необходимого зазора 220 мм показано на рис. 24. Укладка поперечного слоя геосинтетики «Армогат 600/100» показана на рис. 25. Крепление геосинтетики к грунту выполняется с помощью П-образных шпильки из арматурной стали с заточенными концами (рис. 26).



Рис. 24. Обеспечение необходимого зазора между лицевой стенкой и армогрунтовой системой подпорной стены для обеспечения независимой работы армогрунтовой системы и лицевой ж/б стенки



Рис. 26. П-образные шпильки из арматуры Ø10 мм с заточенными концами для крепления геосинтетики

8.4.3. Сопряжение армогрунтовой системы с коммуникациями, пересекающими насыпь

В местах пересечения насыпи коммуникациями не допускается забивка свай. В этих местах запроектированы буровые сваи диаметром 800 мм. На рис. 27 показано бетонирование оголовников буровых свай с размерами 100×100 см.

Траншеи под коммуникации перекрывались железобетонными монолитными балками-ростверками (рис. 28). По этим балкам укладывались сборные железобетонные плиты, перекрывающие промежутки между балками-ростверками (рис. 29).



Рис. 27. На участке между коммуникациями устроены вместо забивных буровые сваи



Рис. 28. Балки-ростверки перекрытия траншеи коммуникации



Рис. 29. Между балками-ростверками промежутки перекрыты ж/б плитами



Рис. 30. Бетонирование колодца ливневой канализации К-95



Рис. 31. Укладка труб системы ливневой канализации

8.4.4. Сопряжение армогрунтовой системы с элементами ливневой канализации

На участке насыпи подхода к транспортной развязке у Фестивальной улицы запроектирована достаточно сложная система ливневой канализации:



Рис. 32. Монтаж арматурных каркасов плит опирания парапетного ограждения

■ водоприемные колодцы, расположенные с двух сторон по краям насыпи, «одеты» в железобетонный кожух; пазухи между лицевой стенкой и примыкающими с трех сторон армогрунтовыми конструкциями подпорных стен решено было заполнить тощим бетоном, изолированным



Рис. 33. Заполнение журнала научно-технического сопровождения СМР

от контакта с геосинтетической обклейкой дорнитом (рис. 30);

■ из водоприемных колодцев с помощью сборных железобетонных труб, укладываемых под уклоном поперек оси насыпи к ее центру, собирали ливневый сток в центральный трубопровод, проходящий вдоль насыпи по разделительной полосе. На рис. 31 показана укладка поперечных водоводов, которые также одевались в монолитный железобетонный короб.

8.4.5. Монтаж блоков парапетного железобетонного ограждения и плит опирания на армогрунт

В соответствии с конструкцией опирания блоков парапетного ограждения на армогрунт с помощью анкерной плиты, представленной на рис. 8, на рис. 32 показан монтаж арматурных каркасов этой системы.

Система была рассчитана в НИЦ «Мосты» на поперечные удары подвижного состава в соответствии с указаниями СНиП 2.05.03-84*. Нагрузка при этом не должна была передаваться на легкую лицевую стенку. Вес блоков и ударная нагрузка передавались на анкерную плиту, опирающуюся на армогрунт через щебенчатую подушку. Такая конструкция впервые была применена в практике транспортного строительства.

Осенью 2014 года участок трассы был готов к открытию движения (рис. 34).

9. Заключение

9.1. Современные масштабы и темпы строительства в России диктуются острой необходимостью развития и совершенствования транспортной инфраструктуры страны в соответствии с требованиями ускоренного обновления всех отраслей промышленного производства.

Успешное решение этих проблем невозможно без опережающего развития транспортной и строительной науки, призванной разрабатывать инновационные конструктивно-технологические решения транспортных сооружений, постоянно совершенствовать и обновлять нормативную базу на основе новейших научных разработок.

9.2. Действующие в России экономические механизмы финансирования научных, проектных и строительных организаций полностью исключают мотивацию всех участников



Рис. 34. Уложено асфальтобетонное покрытие. Насыпь подхода готова к открытию движения

процесса транспортного строительства к снижению стоимости проектных и строительно-монтажных работ; внедрение инновационных решений идет в разрез с интересами проектировщиков, строителей, и даже заказчиков.

9.3. Армогрунтовые системы мостов, автодорог, подпорных стен, противооползневых и других сооружений на транспортных магистралях дают весьма существенный эффект. Стоимость малых и средних мостов может быть снижена почти в два раза, при этом объемы и темпы внедрения инновационных армогрунтовых конструкций оставляют желать лучшего.

9.4. Современный экономический кризис и «санкции» заставили (с большим опозданием) серьезно задуматься об импортозамещении зарубежных геосинтетических материалов для возведения экономичных и эффективных армогрунтовых систем. Такое импортозамещение впервые было осуществлено на строительстве насыпи подхода к транспортной развязке у Фестивальной улицы.

9.5. Проектирование и строительство столь сложной комбинированной армогрунтовой системы невозможно было осуществить без научно-технического сопровождения Филиала ОАО ЦНИИС «НИЦ «Мосты».

9.6. Особо хочется отметить эффективность новой организационной формы руководства строительством в форме постоянно действующего штаба строительства «Комплексное управление проектом (КУП) «Фестивальная» во главе с В.В. Фабером.

9.7. Современные требования, выдвигаемые экспертизой различных уровней, не допускающие отклонений от проектной документации стадии П при разработке стадии Р, стали тормозом на внедрении инноваций в строительстве.

И.В. Лишин, канд. техн. наук;

директор Филиала ОАО ЦНИИС «НИЦ «Мосты»;

А.Д. Соколов, канд. техн. наук; ведущий научный сотрудник

Филиала ОАО ЦНИИС «НИЦ «Мосты»;

В.О. Иванов, заведующий лабораторией металлических мостов;

А.Н. Солодунин,

главный инженер проектов ООО «Союздорпроект»;

Е.А. Свечников, аспирант МАДИ

(для связи с автором **А.Д. Соколовым** –

e-mail: sokalex11@rambler.ru, most@tsniis.com

тел. 8-915-410-37-42)