

ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Д.В. Долгов
доктор технических наук, доцент
заведующий кафедрой «Геодезия и геоинформатика»
Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
г. Москва
karelinamu@mail.ru

А.А. Неретин
кандидат технических наук
доцент кафедры
«Геодезия и геоинформатика»
Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
г. Москва
karelinamu@mail.ru

Методика выбора геосинтетического материала при интенсивной технологии строительства земляного полотна на слабом основании

Разработана методика выбора и назначения геосинтетического материала при интенсивных технологических режимах строительства земляных сооружений на слабых грунтах. При окончательном назначении марки геосинтетического материала в расчётах армированных конструкций предлагается рассматривать два наиболее опасных по безопасности этапа строительства: при отсыпке первого и последнего слоя насыпи

Ключевые слова: геосинтетический материал; земляное полотно; насыпь; основание земляного полотна; прочность; устойчивость; армирование

Развитие строительства автомобильных дорог в регионах с залеганием слабых грунтов в естественном состоянии, которые составляют значительную часть территории России, требует решение ряда сложных научных проблем. Недостаточное внимание к свойствам слабых грунтов в ходе строительства может привести к длительным процессам деформаций земляных земляного полотна автомобильных дорог.

Устойчивость земляного полотна на слабом основании, испытывающего нагрузки от собственного веса грунта и движения строительной техники, а также транспортные нагрузки, возникающие в послепостроечный период, может быть обеспечена армированием [1].

В сочетании с интенсивной технологией возведения земляного полотна геосинтетический материал (ГТ) позволяет улучшить структуру и прочность слабых грунтов в основании. Его применение позволяет эффективно влиять на строительные нагрузки.

Предлагаемая авторами методика основывается на расчёте армированного земляного полотна по двум группам предельных состояний:

- расчёт по группе предельных состояний (по несущей способности);
- расчёт по второй группе предельных состояний (по деформациям).

Как показала практика строительства армированных земляных сооружений с использованием интенсивных технологических режимов [2] наиболее опасные этапы возникают при отсыпке первого и последних слоёв насыпи.

Поэтому во всех расчётах армированных конструкций предлагается рассматривать два этапа возведения их для окончательного выбора геосинтетического материала.

При проектировании и строительстве земляного полотна на слабом основании, армированном геосинтетическим материалом с использованием интенсивных технологических режимов [3], должны быть решены следующие задачи (рис. 1).



Рис. 1. Схема последовательности выбора и назначения геосинтетического материала при интенсивной технологии строительства земляного полотна

1. При расчёте прочности арматуры на разрыв максимальное растягивающее усилие $T_{ГТ}$ в арматуре должно быть выбрано, как наибольшее, из следующих:

а) предельная прочность армоэлемента R_{pj} при интенсивной технологии отсыпки первых слоёв насыпи, обеспечивающая устойчивость насыпи на слабом основании против разрушения по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения (КЦПС), в расчете на 1 пог. метр;

б) предельная прочность армоэлемента R_p по завершению возведения насыпи, обеспечивающая устойчивость насыпи на слабом основании против разрушения по КЦПС, в расчете на 1 пог. метр;

в) сумма из двух сил при отсыпке первых слоёв насыпи и уплотнении катком:

- максимальная предельно-допустимая растягивающая сила $T_{нстj}$ в армирующей прослойке, обеспечивающая устойчивость сооружения против сдвига по плоским поверхностям скольжения, в расчете на 1 пог. метр;

- максимальная предельно-допустимая растягивающая сила $T_{осстj}$ в армирующем элементе, обеспечивающая устойчивость основания, в расчете на 1 пог. метр.

г) сумма из двух сил по завершению строительства насыпи:

- максимальная предельно-допустимая растягивающая сила $T_{нГТ}$ в армирующей прослойке, обеспечивающая устойчивость сооружения против сдвига по плоским поверхностям скольжения, в расчете на 1 пог. метр;

- максимальная предельно-допустимая растягивающая сила $T_{осГТ}$ в армирующем

элементе, обеспечивающая устойчивость основания против выпора, в расчете на 1 пог. метр.

Расчет армированного земляного полотна на слабом основании по несущей способности производится, исходя из условия:

$$\frac{R_d}{f_n} > R_r, \quad (1)$$

где R_r – расчётная прочность геосинтетического материала, т/м;

R_d – долговременная прочность на разрыв арматуры (на срок эксплуатации сооружения), т/м;

$$R_d = \frac{R_k}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6}, \quad (2)$$

где R_k – кратковременная максимальная прочность геосинтетического материала на разрыв, т/м. Значение принимается по сертификату соответствия продукции завода-изготовителя;

K_1 – коэффициент, учитывающий повреждения в процессе строительства сооружения;

K_2 – коэффициент, учитывающий бактериологическое воздействие окружающей среды;

K_3 – коэффициент, учитывающий химическое воздействие окружающей среды;

K_4 – коэффициент, учитывающий соответствие свойств арматуры при изготовлении;

K_5 – коэффициент, учитывающий соответствие физических параметров арматуры при изготовлении;

K_6 – коэффициент, учитывающий старение материала, зависит от проектируемого срока службы сооружения;

f_n – коэффициент надежности по назначению транспортного сооружения, принимаемый равным - 1,0 для неэксплуатируемых насыпей и других армогрунтовых конструкций, например, ремонт откосов выемок, разрушение которых оценивается незначительным экономическим ущербом; 1,1 - для подпорных стен, конструкций насыпей автодорог и железных дорог, дамб.

При расчете армогрунтовых конструкций земляного полотна высотой менее 1,5 м по несущей способности данный коэффициент надежности не учитывается.

2. Накопленную величину дефицита удерживающих сил, определяемую как разность между удерживающими и сдвигающими силами в пределах каждого блока до горизонта укладки ГТ должна воспринимать прослойка из геосинтетического материала.

Следовательно, формула для расчёта коэффициента устойчивости принимает вид:

$$K_{уст} = \frac{\sum N_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum C_i l_i + \sum T_{уд}}{\sum T_{сдв} - R_p}. \quad (3)$$

Расчётная прочность армоэлемента (геосинтетической прослойки) R_p , определяется по формуле:

$$R_p \geq \frac{T_{max} \cdot K_b}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3}, \quad (4)$$

где T_{max} – максимальная нагрузка, воспринимаемая ГТ, соответствующая величине накопленного дефицита удерживающих сил на горизонте предполагаемого расположения армоэлемента, т/м;

K_b – коэффициент запаса для гибких армоэлементов, принимаемый равным 1,1 ÷

1,75;

A_1 – коэффициент учета ползучести, принимают равным $0,5 \div 0,8$;

A_2 – коэффициент учёта стыковки, взаимного перекрытия и соединения полотен ГТ, принимают $0,8$;

A_3 – коэффициент учёта влияния природных факторов, принимаемый равным $0,9$.

Для обеспечения повышения устойчивости насыпи на слабом основании рекомендуется соблюдение следующих условий [4]:

- геосинтетический материал укладывается на выравнивающий слой из песка;
- угол внутреннего трения песка для нижнего слоя насыпи и выравнивающего слоя должен быть не менее 30° ;

- коэффициент трения ГТ по песку должен составлять не менее $0,85 \div 0,9$ от коэффициента трения песка.

3. При послойной отсыпке земляной конструкции, армирующий геосинтетический материал в основании должен удерживать её от боковых смещений, приводящих к потере устойчивости всего армогрунтового сооружения.

Максимальную растягивающую нагрузку $T_{нзмj}$ воспринимает нижний слой арматуры (рис. 2), расположенный в основании насыпи, которая определяется следующей зависимостью:

$$T_{нзмj}^n = 0,5K_a h_j (f_{fs} \gamma_z h_j - 2f_q P_{kj}) \quad (5)$$

где $T_{нзмj}$ – максимальное растягивающее усилие в слое арматуры при j -ом слое отсыпки, в расчёте на 1 пог. метр, $т/м^2$;

K_a – коэффициент активного давления грунта, равный $\text{tg}^2(45^\circ - \varphi_n / 2)$;

h_j – толщина слоя отсыпки насыпи, м;

γ_z – удельный вес насыпного грунта, $т/м^3$;

P_{kj} – приведенная нагрузка от виброкатка на поверхности насыпного j -го слоя, $т/м^2$;

f_{fs} – коэффициент надежности по нагрузке от веса насыпного грунта;

f_q – коэффициент надежности по нагрузке от подвижной нагрузки на насыпь.

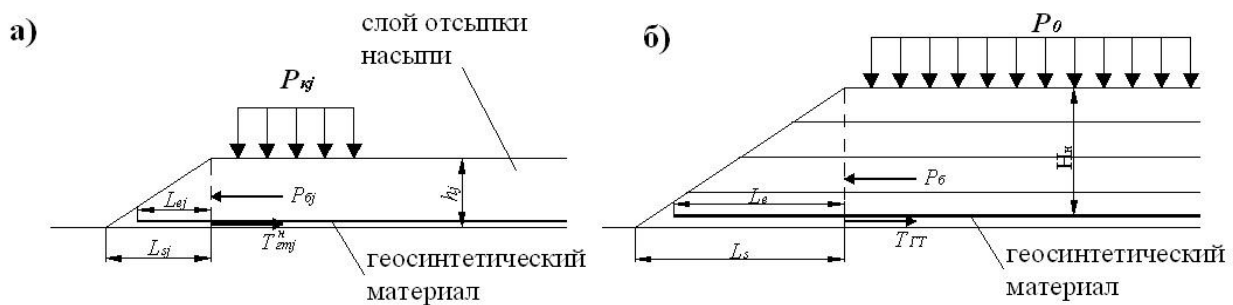


Рис. 2. Схема к расчету устойчивости армированной насыпи по плоским поверхностям скольжения: а) при отсыпке первого слоя насыпи; б) по завершению отсыпки насыпи

Требуемая длина анкеровки арматуры L_{ej} рассчитывается по формуле:

$$L_{ej} \geq \frac{0,5K_a h_j (f_{fs} \gamma_z h_j - 2f_q P_{kj}) f_s f_n}{\gamma_z l \frac{\alpha' \operatorname{tg} \varphi_n}{f_{ms}}}, \quad (6)$$

где f_s – коэффициент надежности на адгезионное разрушение в системе «грунт – арматура»;

l – шаг армирования, м;

α' – коэффициент трения на контакте «грунт – арматура»;

φ_n – угол внутреннего трения насыпного грунта в эффективных напряжениях;

f_{ms} – коэффициент надежности по грунту.

По завершению строительства насыпи рекомендуется провести расчёты устойчивости и сопоставить возникающий армирующий эффект $T_{ГТ}$ с первоначальным его значением (при отсыпке первого слоя) для окончательного назначения типа армирующего геотекстиля.

В этом случае максимальная растягивающая нагрузка $T_{нГТ}$ определяется по формуле:

$$T_{ГТ}^n = 0,5K_a H_n (f_{fs} \gamma_z H_n - 2f_q P_o), \quad (7)$$

где $T_{нГТ}$ – максимальное растягивающее усилие в геосинтетическом материале, в расчете на 1 пог. метр, т/м²;

H_n – высота насыпи, м;

P_o – приведенная равномерно-распределённая нагрузка на поверхности насыпи, т/м².

4. При послойной отсыпке и вибрационном уплотнении земляного сооружения армирующий геосинтетический материал должен препятствовать возникновению выпора грунта основания.

Расчет сводится к определению предельной нагрузки, при которой у армогрунтовой конструкции, передающей основанию вертикальную нагрузку, происходит выпор грунта.

Вследствие этого, как показала практика [5], происходит резкое прогрессирующее нарастание вертикальных перемещений, что приводит к проявлению глубинного сдвига всего тела конструкции. Расчеты проводятся с учетом нестабилизированного состояния грунтов.

Механизм разрушения предусматривает выпор грунта основания из-под нижнего слоя армирующей прослойки (рис. 3а). Одна из возможных мер, предотвращающих такую систему разрушения, состоит в применении высокопрочной геотекстильной ткани, имеющей высокий условный модуль деформации, что обеспечивает ее гибкость по подошве сооружения, позволяя приспособиться к деформациям уплотнения, которые возникают в процессе строительства сооружения и его эксплуатации, то есть в процессе консолидации слабого грунта.

Для того чтобы повысить несущую способность основания, необходимо ограничить перемещение грунта основания за счет мобилизации сопротивления сдвигу на требуемой длине по нижней поверхности арматуры, уложенной на основание насыпи.

При этом необходимо выполнение двух условий.

Во-первых, полное сопротивление сдвигу по нижней поверхности арматуры должно быть достаточным, чтобы противостоять касательным напряжениям, возникающим в грунте основания.

Во-вторых, материал арматуры, должен иметь достаточный предел прочности на разрыв, чтобы противостоять растягивающим напряжениям, возникающим под действием касательных напряжений, которые, в свою очередь, являются результатом взаи-

модействия арматуры с грунтом основания.

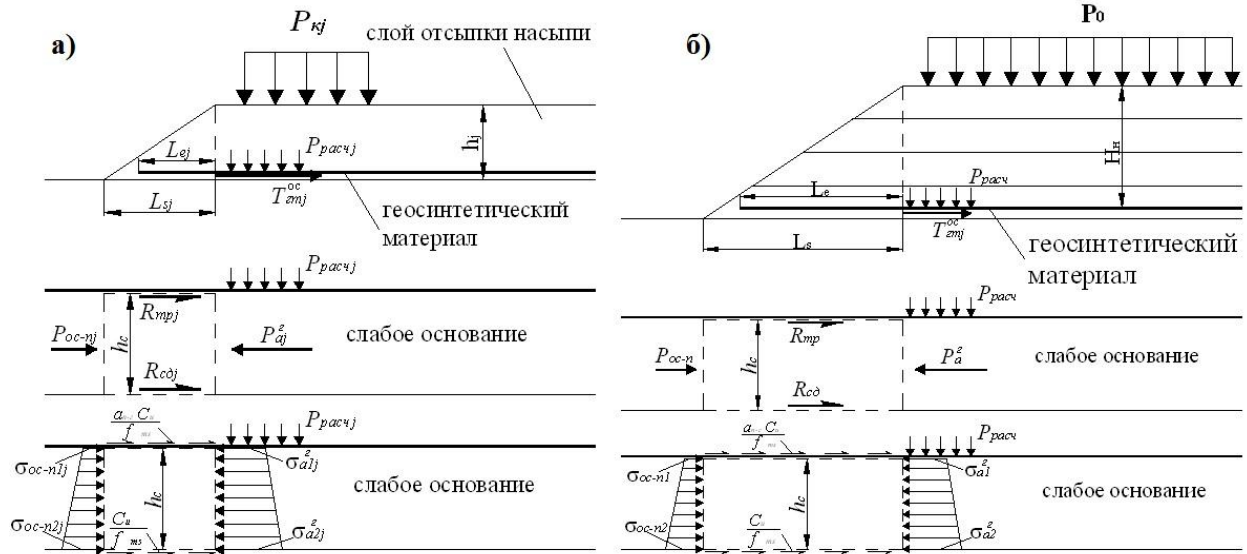


Рис. 3. Расчетная схема к определению несущей способности основания земляного полотна: а – при отсыпке и уплотнении j -го слоя насыпи; б – при возведении всей насыпи

Несущая способность основания обеспечивается при выполнении следующего условия:

$$P_a^z \leq F_{oc-n} - R_{cd} - R_{mp}, \quad (8)$$

где P_a^z – горизонтальная составляющая активного давления грунта, т/м^2 ;

F_{oc-n} – сила сопротивления трению между грунтом слабого основания и прослойкой из геосинтетического материала, т/м^2 ;

R_{cd} – равнодействующая сила сопротивления сдвигу грунта основания на глубине h_c , т/м^2 ;

R_{mp} – равнодействующая сила сопротивления трению грунта основания по нижней поверхности арматуры, т/м^2 .

Анализ по этому методу предусматривает оценку влияния геосинтетической прослойки на устойчивость слабой толщи h_c и предназначен, в первую очередь, для определения минимально требуемой эффективной длины анкеровки материала L_s , предотвращающей выпор грунта основания.

Поэтому расчёт сводится к определению минимальной эффективной длины анкеровки при самых опасных режимах возведения земляного сооружения: при первых слоях отсыпки и по завершению возведения всей насыпи (рис. 3б). Из всех полученных значений длины анкеровки выбирается самый наихудший вариант, т.е. наибольшее значение минимальной эффективной длины анкеровки.

При ограниченной мощности слабого основания и в случае, если при естественной влажности его сопротивление сдвигу меняется по глубине незначительно, то минимальную эффективную длину анкеровки материала L_s следует определять по следующим зависимостям:

1) при послойной отсыпке насыпи:

$$L_{sj} \geq \frac{\left(f_{fs} \gamma_z h_j + f_q P_{kj} - \frac{4C_u}{f_{ms}} \right) h_c}{(1 - a_{n-z}) C_u f_{ms}}, \quad (9)$$

2) по завершению строительства насыпи:

$$L_s \geq \frac{\left(f_{fs} \gamma_z H_n + f_q P_0 - \frac{4C_u}{f_{ms}} \right) h_c}{(1 - a_{n-z}) C_u f_{ms}}, \quad (10)$$

где C_u – сопротивление сдвигу слабого грунта основания при отсутствии дренирования, т/м²;

h_c – мощность слоя слабого грунта в основании, м;

a_{n-z} – адгезия на контакте прослойки из геосинтетического материала с грунтом.

Горизонтальные напряжения, возникающие в грунте слабого основания, предлагается определять по следующим зависимостям:

$$\sigma_{oc-n1j} = \frac{2C_u}{f_{ms}}, \quad (11)$$

$$\sigma_{oc-n2j} = \frac{2C_u}{f_{ms}} + \gamma_z^{oc} h_c, \quad (12)$$

$$\sigma_{a1j}^2 = P_{расчj} \frac{2C_u}{f_{ms}}, \quad (13)$$

$$\sigma_{a2j}^2 = P_{расчj} \frac{2C_u}{f_{ms}} + \gamma_z^{oc} h_c, \quad (14)$$

Требуемое растягивающее усилие, возникающее в прослойке материала, определяется как:

а) при послойной отсыпке в расчете на один пог. метр:

$$T_{zmj}^{oc} = \frac{a_{n-z} C_{uo} L_{sj}}{f_{ms}}, \quad (15)$$

б) при возведении насыпи на проектную высоту:

$$T_{zme}^{oc} = \frac{a_{n-z} C_{uo} L_s}{f_{ms}}, \quad (16)$$

где L_{sj} – требуемая длина анкерки геосинтетического материала, м;

C_{uo} – сопротивление сдвигу грунта основания при отсутствии дренирования по нижней поверхности прослойки, т/м².

5. При наезде тяжёлого катка геосинтетический материал должен быть устойчив к восприятию кратковременной мгновенно приложенной нагрузки, обеспечивая тем самым безопасную нагрузку на слабое основание.

При устройстве прослойки из геотекстиля, чаще всего тканого, в основании земляного сооружения происходит значительное снижение потери местной устойчивости слабых грунтов при движении грунтоуплотняющей техники по отсыпанному слою насыпи.

В работах [2;3] было установлено, что наиболее опасные режимы возведения земляного полотна методом интенсивной технологии наступают при отсыпке первого слоя насыпи, в связи нарушения устойчивости слабого основания и последующего вы-

пора грунта.

Самым распространенным способом снижения риска возникновения неустойчивого основания является увеличение толщины первого слоя отсыпки, но в этом случае уменьшаются площадь контактных давлений передаваемых на слабый грунт от грунтоуплотняющей техники.

Предлагается рассмотреть новый подход обеспечения безопасности отсыпки первого слоя насыпи, с использованием геотекстильной прослойки в основании. Это подход предполагает сохранение минимально допустимой толщины первого слоя по критерию безопасности ($K_{без}$) с добавлением геотекстильной прослойки в основание.

Рассмотрим поведение армирующей прослойки в местах наезда тяжёлого виброкатка для учёта возникающих сил натяжения в материале и дальнейшей корректировки методики назначения марки геосинтетического материала.

Предполагается, что под полосой наката виброкатка на расчётном горизонте прослойки из геосинтетического материала действует приведенная вертикальная нагрузка P_0 , вызывающая накопление деформаций (рис. 4).

$$P_0 = \gamma h_1 + P_k, \quad (17)$$

где γ – удельный вес насыпного грунта, т/м³;

h_1 – толщина первого слоя насыпи, м;

P_k – приведенная нагрузка от катка с вибрацией, т/м².

При интенсивном уплотнении первого слоя возникает осадка S_{max1} , зная максимальную ожидаемую осадку от уплотнения первого слоя, можно определить максимальное удлинение ГТ Δ :

$$\Delta = b' - b, \quad (18)$$

$$b' = \frac{l}{2} + \sqrt{c^2 + S_{max1}^2}, \quad (19)$$

$$c = h_1 \operatorname{tg} \Theta = h_1 \operatorname{tg} \left[45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right], \quad (20)$$

где b – половина длины активной зоны расчётной нагрузки от катка и насыпного слоя, м;

b' – длина геотекстильного материала с учётом осадки S_{max1} , м;

l – длинная вальца виброкатка, м;

S_{max1} – максимальная осадка, возникающая от уплотнения первого слоя, м;

Θ – угол рассеивания напряжений от катка, град.;

φ – угол внутреннего трения насыпного грунта.

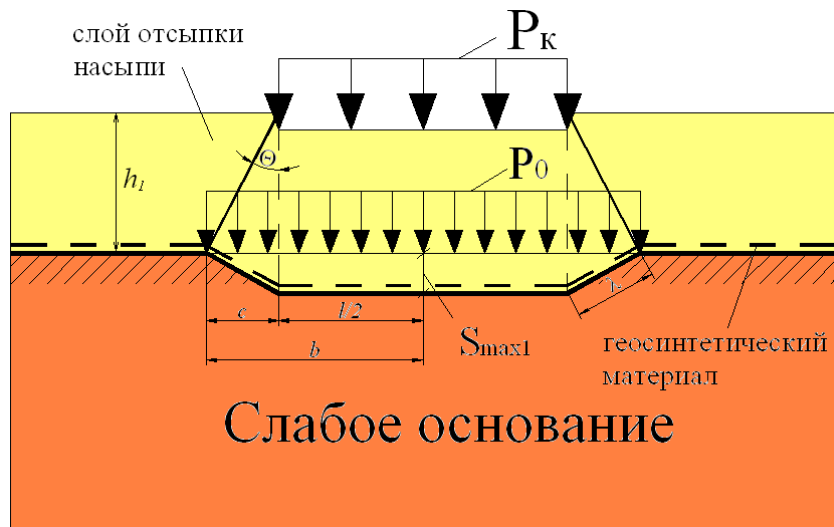


Рис. 4. Схема для расчёта параметров ГТ при наезде виброкатка

Через максимальное относительное удлинение ε_0 и условный модуль деформации ГТ E_{zm} определим значение растягивающего усилия, возникающего в прослойке:

$$T_{zm} = E_{zm} \varepsilon_0, \quad (21)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta}{b}, \quad (22)$$

$$m = \frac{T_{zm} \operatorname{tg} \varphi}{P_0 + P_0 \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}. \quad (23)$$

Назначив геотекстильный материал, определим значение нагрузки на слабое основание через армирующую прослойку:

$$P_0^{zm} = P_0 - \frac{(T_{zm} - P_0 m \operatorname{tg} \varphi) \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{b - m}. \quad (24)$$

Далее следует проверка местной устойчивости слабого основания по безопасной нагрузке $P_{без}$ на слабое основание:

$$P_0^{zm} \leq P_{без}. \quad (25)$$

Устройство армирующей прослойки из тканого геотекстиля позволило снизить высоту первого слоя отсыпки 0,8 м до 0,6 м (на 30%) без потери устойчивости слабого основания, что является одним из важных условий реализации интенсивных технологических режимов.

6. Водопроницаемость ГТ должна быть выше водопроницаемости грунта верхнего слоя основания.

Дренажирующая прослойка укладывается на тщательно спланированное основание или уплотнённую поверхность грунта. При этом должно быть исключено местное обжатие геотекстиля при послойной отсыпке насыпи и от движения уплотняющей техники [3;6].

Количество воды Q , которое может отвести геосинтетическая прослойка, определяется по формуле:

$$Q = K_{\phi}^{zm} \delta J (1 - \partial_{p_0}), \quad (26)$$

где K_{ϕ}^{zm} – коэффициент фильтрации геосинтетического материала в продольном направлении при уплотнении расчётной нагрузкой P_0 , м/сут;
 δ – толщина материала в ненагруженном состоянии, м;
 J – гидравлический градиент;
 ∂_{p0} – относительная осадка материала под действием расчётной нагрузки P_0 , м.

Таким образом, расчет устойчивости в системе «насыпь – ГТ – вибророл – слабое основание» обеспечивает надежность и безопасность армогрунтовых конструкций земляного полотна на слабом основании.

Это позволяет отказаться от традиционных способов укрепления оснований – замены слабого грунта на кондиционные грунты с удовлетворительными свойствами, использования добавок или свайных фундаментов под насыпь.

Литература

1. Марьяма П. Армирование грунтовых конструкций и дорожных одежд геосетками Tensar. // Транспортное строительство, 1999., №3. – с. 23 – 24.
2. С.Я. Луцкий, Д.В. Долгов, Ю.Н. Юдов Опыт применения интенсивной технологии строительства земляных сооружений. // Транспортное строительство, 2005., №5. – с. 14 – 18.
3. Рекомендации по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях / Под общ. редакцией С.Я. Луцкого – М.: Информационно-издательский центр «Тимр», 2005. с. 96.
4. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Информавтодор, 2004 г.
5. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов: Учебник для гидротехнических спец. вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 1991. – 447 с.
6. Каддо М.Б. Армогрунтовые конструкции из геотканей Geolon // Транспортное строительство, 2003., №6. – с. 22 – 23.