

Министерство просвещения Украины  
КИЕВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Павлек Дмитрий Александрович

УДК 624.131.525:625.731.4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
АРМИРОВАННЫХ НАСЫПЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ  
МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОСЛОЙКИ С ГРУНТОМ

Специальность 05.23.11 – Строительство  
автомобильных дорог и аэродромов

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1993



00814702 (M)

Робота виконана в Київському АН

Научні керівники:

канд.техн.наук, доцент

С.С.Кизима.

Офіційні опоненти:

докт.техн.наук, ст.научн. сотр.

Н.М.Кризский

канд.техн.наук, ст.научн. сотр.

Н.Ф.Сасько

Ведущая организация -

Український державний інститут  
по проектуванню дорожнього господарства  
"Укргішродор"

Захиста состоится 28 мая 1993 года на заседании специализированного совета Д.068.09.02 при Киевском автомобильно-дорожном институте по адресу: 252010, г. Киев-10, ул. Суворова, 1, ауд. 333-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан

28 августа 1993 г

Ученый секретарь  
специализированного совета  
канд.техн.наук, профессор

Н.Н. Дмитриев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание технологий, основанных на применении новых материалов, признано главным направлением научно-технического прогресса. В последние 20 лет в качестве примера реализации этого направления в мировой практике дорожного строительства выступает использование насыпей, армированных геотекстильными прослойками (ГТП). Армирование позволяет возводить высокие насыпи с откосами повышенной крутизны, использовать при этом некондиционные грунты. В результате достигается значительная экономия затрачиваемых на строительство средств за счет сокращения объемов земляных работ, сужения полосы отвода, уменьшения длины водопропускных труб.

О высокой эффективности применения армогрунтовых конструкций свидетельствует тот факт, что объем изготовления синтетических полимерных материалов в мире с 1970-го года вырос в 100 раз и в настоящее время составляет более 500 миллионов м<sup>2</sup>/год, из которых 70 процентов используется при строительстве дорог.

В сравнении с изложенным следует отметить значительное отставание Украины, где применение ГТП в дорожном строительстве не нашло должного распространения. Причинами такого отставания является отсутствие как достаточно серьезного опыта строительства и эксплуатации армированных конструкций земляного полотна, так и подходящей методики их проектирования. Известные методики проектирования либо защищены от использования, т.к. содержат ноу-хау и могут применяться лишь самими разработчиками, либо не учитывают особенностей Украины, либо недостаточно совершенны.

Целью исследования является совершенствование методики проектирования автодорожных насыпей с местным армированием геотекстильными прослойками на основе исследования математических моделей, построенных с учетом новых показателей, характеризующих взаимодействие произвольно расположенной в теле насыпи прослойки с грунтом, явлений и эффектов, возникающих в зоне их контакта, и характеристик прослойки, соответствующих реальным условиям ее работы в армогрунтовых конструкциях.

Научная новизна. Поставлена и решена задача о напряженно-деформированном состоянии произвольно расположенной в устойчивой части насыпи геотекстильной прослойки и находящегося в ее окрестности грунта.

Практическая ценность. Разработаны методика определения расчетных деформативных и прочностных характеристик прослойки, способы и устройства для определения показателей, характеризующих взаи-

модействие прослойки с грунтом. Полученные математические модели и вычислительные программы позволяют на основе расчетов напряженно-деформированного состояния элементов армогрунтовых конструкций совершенствовать методы проектирования насыпей с местным армированием геотекстильными прослойками, способы и средства для их технологического осуществления.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на межреспубликанских научно-технических конференциях "Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог" (Суздаль, 1992 г.), и "Проблемы проектирования строительства и эксплуатации местных автомобильных дорог" (Минск, 1992 г.).

Публикации. По материалам диссертации имеется 8 публикаций, получено авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, вместе с которыми ее объем составляет 315 страниц. Текст иллюстрируется 118 рисунками и содержит 26 таблиц.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализировано состояние вопросов, связанных с использованием ГТП для армирования земляного полотна, решению которых были посвящены многочисленные работы В.Д.Казарновского, В.И.Заворицкого, А.Г.Полуновского, Ю.В.Пудова, Н.М.Смулова, Т.Ингольда, Д.Гринвауда, Е.Я.Лейбмана, В.И.Рувинского, Б.П.Брантмана, А.Г.Дорфмана, А.И.Складнева, Д.В.Штикеля, и других авторов.

Большая часть указанных работ посвящена разработке способов исследования напряженно-деформированного состояния армированных насыпей при помощи численных методов, широкому распространению которых в практике препятствует отсутствие в них четко определенного критерия устойчивости. Поэтому наибольшее практическое значение получили способы обоснования конструктивных параметров армированных насыпей, основанные на анализе предельного равновесия, имеющие четко определенный критерий - коэффициент устойчивости откосов.

Из всего многообразия способов армирования, ввиду значительной неравномерности осадок и напряжений, локального характера разрушений насыпей, более целесообразным является местное армирование, при котором прослойки располагаются в отдельных местах поперечного профиля земляного полотна и достигается экономия, вообще говоря, недешевых геотекстильных материалов. Следует признать, что насыпи, армированные на всю ширину, обладают большими запасами прочности и надежности, что достигается, однако, за счет большего или меньшего

перерасхода геотекстильных материалов. В связи с этим возрастает ответственность технических решений, принимаемых при проектировании насыпей с местным армированием ГТП. Отсюда следует актуальность вопроса совершенствования методики проектирования указанных насыпей, усугубляемая тем, что известные в настоящее время методики и конструктивные схемы местного армирования предполагают, что поверхность прослоек в грунте имеет форму плоскости (наклонной или горизонтальной). Указанное предположение отражает скорее желаемое, чем действительное положение прослоек, так как на самом деле в результате неравномерных осадок как при возведении, так и на стадии эксплуатации насыпей, форма их может значительно отклоняться от плоскости. Следует отметить также, что положение прослойки, отличное от горизонтального, может быть задано искусственно на стадии строительства. Отсюда следует целесообразность рассмотрения общего случая, при котором проекция прослойки на поперечное сечение земполотна имеет вид произвольной кривой.

Расчет важнейших конструктивных параметров, в частности, длины заделки прослойки в устойчивой части насыпи, основан на использовании условия предельного равновесия по сцеплению прослойки в грунте. Ввиду значительной деформативности геотекстильных материалов во многих случаях состояние предельного равновесия наступает после того, как в армированной конструкции возникнут недопустимые деформации с потерей необходимой формы. Точное же решение задачи о деформациях в пределах используемого подхода, с использованием известных показателей взаимодействия прослойки с грунтом, принципиально невозможно из-за неопределенности краевых условий для смещения точек контакта прослойки с грунтом.

В большинстве случаев в расчетах напряженно-деформированного состояния прослойки используется значение модуля деформации, определяемое при испытаниях на растяжение отрезка прослойки, не имеющего ограничений для поперечной деформации. Определенное таким образом значения модуля деформации не соответствует реальным условиям работы прослойки в грунте (плоская задача) и требует уточнения.

Указанные недостатки приводят к тому, что выполняемые при обосновании конструктивных параметров армированных насыпей расчеты дают результаты, отклонение которых от опытных данных может достигать 80 и более процентов. В одних случаях это приводит к разрушению армированных насыпей, в других - к неоправданному перерасходу геотекстильных материалов, экономия которых в условиях Украины является актуальной задачей.

В соответствии с выполненным анализом и поставленной целью

сформулированы следующие задачи исследования:

- 1) обоснование показателей, характеризующих взаимодействие прослойки с грунтом;
- 2) уточнение расчетных деформативных характеристик прослойки;
- 3) изучение и количественное описание возникающих в зоне контакта прослойки с грунтом эффектов и явлений;
- 4) построение и исследование математических моделей взаимодействия прослойки с грунтом;
- 5) экспериментальная проверка математических моделей и положений, на которых они основаны;
- 6) разработка рекомендаций по совершенствованию методики проектирования насыпей с местным армированием ГТП и способов их практического осуществления.

Во второй главе излагаются теоретические исследования по совершенствованию методики проектирования насыпей с местным армированием геотекстильными прослойками.

В настоящее время для описания взаимодействия геотекстильной прослойки (ГТП) с грунтом в большинстве случаев используют угол трения и сцепление - показатели, аналогичные показателям прочности самого грунта на сдвиг. Они характеризуют лишь предельный случай взаимодействия прослойки с грунтом, соответствующий возникновению в зоне их контакта максимальных касательных напряжений и не несут в себе никакой информации ни о том, какие напряжения возникают в контакте до наступления состояния предельного равновесия, ни о том, какие деформации точек контакта имеют при этом место.

В работах Л. Локотчи и А. В. Верховского показано, что предельные касательные напряжения в зоне контакта твердых тел возникают не сразу после приложения сдвигающей силы, а лишь тогда, когда смещение каждой точки их контакта относительно первоначального положения достигнет определенной величины, названной предварительным смещением.

В теории трения известны также понятия жесткости сочленения  $C_k$  и средней касательной жесткости  $C_{k, \text{ср}}$

$$C_k = \frac{d F}{d x}, \quad (I) \quad C_{k, \text{ср}} = \frac{F}{d}, \quad (2)$$

где  $F$  - приложенная касательная сила;  $x$  - смещение;  $d$  - предварительное смещение, используемое для расчета контактного взаимодействия металлов.

Непосредственно использовать указанные понятия для случая взаимодействия прослойки с грунтом невозможно в связи с тем, что смещения точек их контакта не одинаковы по длине ГТП, а сдвигающая

сила распределена неравномерно.

Касательные напряжения  $\tau_{тр}$  силы трения в каждой точке контакта ГТП с грунтом можно представить в виде:

$$\tau_{тр} = c u, \quad u < d; \quad (3)$$

$$\tau_{тр} = f r, \quad u \geq d, \quad (4)$$

где  $u$  - смещение точки;  $r$  - нормальное давление;  $f$  - коэффициент трения;  $d$  - предварительное смещение.

Коэффициент пропорциональности  $c$  будем называть касательной жесткостью контакта (КЖК) ГТП с грунтом. Она имеет размерность Па/м и с физической точки зрения представляет собой обусловленное трением касательное напряжение при смещении, равном единице.

Зависимость, аналогичная (3), использовалась В.А.Флориным при описании касательных нагрузок от сил трения в анкерных понурах гидротехнических сооружений. Коэффициент пропорциональности вводился по аналогии с коэффициентом постели и назван коэффициентом постели для сдвига.

Вместо выражения (4) можно было бы использовать двучленный закон трения. Однако, в этом случае усложняется построение и исследование математических моделей взаимодействия прослойки с грунтом, а также повышается трудоемкость определения составляющих указанного закона на практике. Будем считать, что уже на стадии проектирования армированных конструкций можно получить достаточно точную оценку нормального давления, при котором будет работать прослойка, а вместе с этим принять соответствующее ему значение коэффициента трения.

Как предварительное смещение, так и КЖК являются комплексными показателями взаимодействия грунта и прослойки, которые нужно рассматривать как специфические константы (как, например, угол внутреннего трения и сцепление для грунта), характеризующие не тот или иной грунт или прослойку в отдельности, а именно их контактное взаимодействие.

Из выражений (3) и (4) следует зависимость между рассматриваемыми показателями:

$$c = \frac{f r}{d}. \quad (5)$$

Постановка задачи построения математических моделей заключалась в следующем (рис. 1). На прослойку, проекция которой на плоскость поперечного сечения земляного полотна имеет вид произвольной кривой  $KNQ$ , описываемой известной вектор-функцией

$$\vec{r} = (X_K + x(s))\vec{e}_1 + (Z_K + z(s))\vec{e}_3, \quad (6)$$

вместе с которой в каждой точке определены единичные векторы - ка-

сательный  $\bar{\tau}$  и нормальный  $\bar{\nu}_z$  в точке N пересечения ее с поверхностью скольжения приложена сила  $T_1$ , обусловленная дефицитом устойчивости откоса. В произвольной точке A прослойки, также как и в других точках, приложен вектор  $F$  равнодействующей внешних сил. Зависимость  $T = T_1(\epsilon_s)$ , между силой натяжения прослойки и относительной деформацией, которая после определенного промежутка времени считается установившейся, предполагается известной. При всех указанных обстоятельствах необходимо было построить математические модели взаимодействия прослойки с грунтом, позволяющие исследовать напряженно-деформированное состояние элементов насыпи с местным армированием ГТП. Полное решение указанной задачи связано с большими трудностями даже при отсутствии прослоек. Поэтому мы ограничились рассмотрением только напряженно-деформированного состояния прослоек и той части грунта, которая находится в окрестности прослоек, т.е. вблизи зоны их непосредственного контакта, полагая, что именно в этой зоне возможны явления и процессы, которые для армированных насыпей являются расчетными.

Точность получаемых с помощью математических моделей результатов сильно зависит от того, насколько входящие в них характеристики прослойки соответствуют действительности. Зависимость силы натяжения от относительной деформации уточнялась путем добавления известного в теории упругости множителя, содержащего коэффициент поперечной деформации  $\mu_y$

$$T = \frac{E_0}{1 - \mu_y^2} \epsilon_s \quad (7)$$

где  $E_0$  - модуль деформации, определенный при испытаниях на растяжение отрезка ГТП.

Применение силы натяжения для характеристики напряженного состояния ГТП основано на аналогии с механикой деформируемых одномерных тел переменной длины. Можно сказать, что это не совсем удачная аналогия, т.к. в указанной области механики рассматривают тела в стадии упругих и малых продольных деформаций без боковой нагрузки, когда поперечные деформации считаются бесконечно малыми, площадь поперечного сечения - постоянной. При взаимодействии ГТП с грунтом толщина ее сильно изменяется как вследствие нормального давления грунта, так и вследствие ее растяжения. При одной и той же силе натяжения в случае различной толщины прослойки напряжения в ней будут различными. Поэтому для более точного описания напряженного состояния прослойки предлагается использовать зависимость истинного напряжения, под которым понимается отношение силы натяжения

к фактической площади поперечного сечения от относительной деформации, в виде:

$$\sigma_B = \frac{E_0}{\delta_{O1} (1 - \mu_y^2) (1 - \mu_y \epsilon_B)} \epsilon_B \quad (8)$$

где  $\mu_y$  - коэффициент поперечной деформации ГТП в нормальном к ее поверхности направлении;  $\delta_{O1}$  - толщина ГТП при отсутствии растягивающей нагрузки, которая представляется в виде функции

$$\delta_{O1} = \delta(\sigma_y, \delta_0), \quad (9)$$

где  $\sigma_y$  - нормальное к поверхности ГТП давление;  $\delta_0$  - толщина ГТП в открытом воздухе.

В ходе решения третьей задачи исследован эффект клина. Предположение о наличии такого эффекта возникло при сравнении опытных и расчетных данных о величине удерживающей ГТП в грунте силы, полученных в Сокодорнии. Опытные данные превосходили расчетные, что свидетельствовало о наличии некоторого дополнительного сопротивления, природа которого до сих пор не была установлена. По нашему предположению, указанное сопротивление связано с эффектом клина, обусловленным неравномерностью действительной толщины  $\delta_g$  ГТП при растяжении, зависящей от относительной деформации

$$\delta_g = \delta_{O1} (1 - \mu_z \epsilon_B). \quad (10)$$

Значение  $\epsilon_B$  больше на конце прослойки, в месте приложения выдерживающей силы. Поэтому ГТП в продольном сечении приобретает форму клина, что приводит к возникновению дополнительных касательных напряжений (рис.2), для общего вида которых найдено выражение:

$$\tau_{кл} = \sigma_y \left| \xi(\bar{\tau}, \bar{e}_3)(\bar{e}_1, \bar{\nu}) - (\bar{\tau}, \bar{e}_1)(\bar{e}_3, \bar{\nu}) \right| \delta_{O1} \mu_z \frac{d\epsilon_B}{ds}. \quad (11)$$

Построение математических моделей взаимодействия ГТП с грунтом основывалось на составлении уравнения равновесия бесконечно малого отрезка прослойки длиной  $ds$  и шириной  $I_m$  (рис.3) под действием приложенных к нему сил натяжения  $T$  и  $T'$ , действующих соответственно с правой и с левой стороны отрезка, и равнодействующей  $F$  внешних сил, в число которых входят вертикальная нагрузка от вышележащего слоя грунта, обусловленная боковым давлением грунта горизонтальная нагрузка, нормальная реактивная сила давления грунта и сила трения прослойки с грунтом, в общем случае имеющая 2 составляющие - верхнюю и нижнюю, и сила, обусловленная эффектом клина.

При проецировании указанных сил на вектор  $\bar{\tau}$  учитывалась особенность передачи касательной нагрузки на верхнюю поверхность.

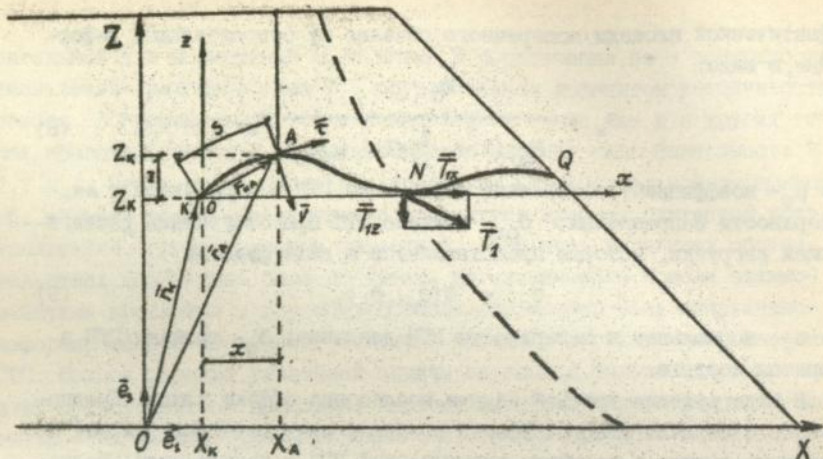


Рис.1. К постановке задачи построения математических моделей.

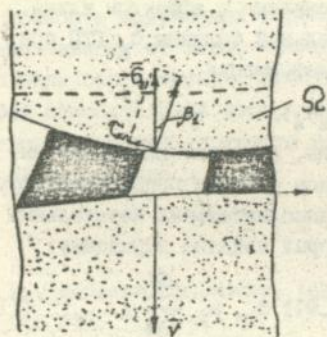


Рис.2. Эффект клина.

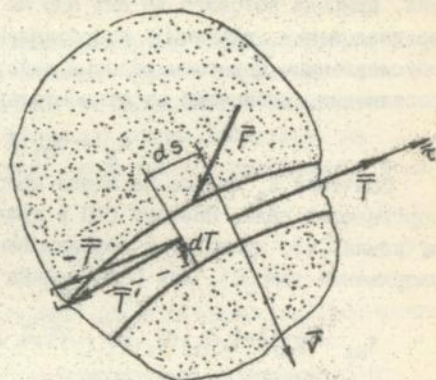


Рис.3. К составлению уравнений равновесия.

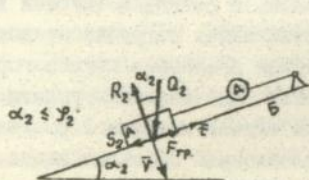


Рис.4. Особенность передачи касательной нагрузки.

ГТП, установленная с использованием известного в теоретической механике понятия конуса трения для тела, находящегося на наклонной площадке (рис.4). Если угол  $\alpha_2$  между направлением силы тяжести  $Q_2$  и нормалью к поверхности удовлетворяет условию  $\alpha_2 \leq \phi_2 = \text{arctg } f$ , то тело останется в состоянии покоя или сцепления с поверхностью, так как сдвигающая сила  $S_2 = Q_2 \sin \alpha_2$  уравновешивается равной ей по величине силой трения  $F_{\text{тр}}$ . При  $\alpha_2 > \phi_2$  величина сдвигающей силы определяется по-прежнему, а для силы трения имеем  $F_{\text{тр}} = f Q_2 \cos \alpha_2$ . Таким образом, в последнем случае поверхность воспринимает не всю сдвигающую силу, а только часть ее, равную по модулю силе трения, и для касательного напряжения на поверхности имеем

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{Q_2}{S} \sin \alpha_2, & \alpha_2 \leq \phi_2; \\ \tau &= \frac{f Q_2}{S} \cos \alpha_2, & \alpha_2 > \phi_2, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $S$  - площадь основания тела.

Превышение сдвигающей силы над силой трения обуславливает возникновение реакции упругой связи, которая на рис.4 представлена в виде динамометра Д. Если вместо тела А рассматривать соответствующий ему объем грунта, ограниченный сверху поверхностью грунтового массива, то, при отсутствии упругой связи, указанное превышение обуславливает боковое давление грунта, а особенность передачи касательной нагрузки на наклонную площадку, в том числе и на поверхность ГТП, также имеет место.

В соответствии с указанной особенностью построенные математические модели взаимодействия грунта с ГТП для участков прослойки, имеющих различный угол наклона к горизонту, отличаются друг от друга. Они получены в виде систем неоднородных дифференциальных уравнений до второго порядка включительно относительно силы натяжения, относительной деформации ГТП и смещения точек контакта ее с грунтом для случаев, когда скалярным аргументом функции (6) является как длина прослойки  $v$ , так и длина ее горизонтального проложения  $x$ . Для участков прослойки, где  $\alpha_2 < \text{arctg } f_B$ , в случае  $\bar{\Gamma} = \bar{\Gamma}(v)$  указанные системы уравнений имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{B} \frac{dT}{dv} + \gamma(H - z_K - z) \dot{z} \dot{x} (\xi - 1) - \tau_{\text{тр.н}} &= 0; \\ \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2} \frac{T}{B} + \gamma(H - z_K - z) \frac{(\xi \dot{z} \bar{x} - \bar{z} \dot{x})}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2}} + \tau &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_0}{1 - \mu_y^2} \frac{d\varepsilon_B}{ds} + \gamma(H - z_K - z) \dot{z} \dot{x} (\xi - 1) - \tau_{\text{тр.н}} &= 0; \\ \frac{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2}}{1 - \mu_y^2} E_0 \varepsilon_B + \gamma(H - z_K - z) \frac{(\xi \dot{z} \bar{x} - \bar{z} \dot{x})}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2}} + \Gamma &= 0, \end{aligned} \right\} \text{(I4)}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_0}{1 - \mu_y^2} \frac{d^2 u}{ds^2} + \gamma(H - z_K - z) \dot{z} \dot{x} (\xi - 1) - \tau_{\text{тр.н}} &= 0; \\ \frac{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2}}{1 - \mu_y^2} E_0 \frac{du}{ds} + \gamma(H - z_K - z) \frac{(\xi \dot{z} \bar{x} - \bar{z} \dot{x})}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2}} + \Gamma &= 0. \end{aligned} \right\} \text{(I5)}$$

Для участков прослойки, где  $\alpha_2 > \arctg f_B$ , в случае  $\bar{\Gamma} = \bar{\Gamma}(x)$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{B} \frac{dT}{dx} \frac{1}{\sqrt{1 + z'^2}} + \frac{f_B \gamma(H - z_K - z)}{(1 + z'^2) (\xi z'^2 + 1) \text{sign}[z'(\xi - 1)]} - \tau_{\text{кл}} - \tau_{\text{тр.н}} &= 0; \\ \frac{|z''|}{(1 + z'^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{T}{B} - \frac{\gamma(H - z_K - z) z''}{(1 + z'^2) |z''|} (\xi z'^2 + 1) + \Gamma &= 0, \end{aligned} \right\} \text{(I6)}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_0}{1 - \mu_y^2} \frac{d\varepsilon_B}{dx} \frac{1}{\sqrt{1 + z'^2}} + \frac{f_B \gamma(H - z_K - z)}{(1 + z'^2) (\xi z'^2 + 1) \text{sign}[z'(\xi - 1)]} - \tau_{\text{кл}} - \tau_{\text{тр.н}} &= 0; \\ \frac{E_0}{1 - \mu_y^2} \frac{|z''| \varepsilon_B}{(1 + z'^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{\gamma(H - z_K - z) z''}{(1 + z'^2) |z''|} (\xi z'^2 + 1) + \Gamma &= 0, \end{aligned} \right\} \text{(I7)}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_0}{1 - \mu_y^2} \frac{1}{1 + z'^2} \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{E_0}{1 - \mu_y^2} \frac{z' z''}{(1 + z'^2)^2} \frac{du}{dx} + \frac{f_B \gamma(H - z_K - z)}{(1 + z'^2) (\xi z'^2 + 1) \text{sign}[z'(\xi - 1)]} - \tau_{\text{кл}} - \tau_{\text{тр.н}} &= 0; \\ \frac{E_0}{1 - \mu_y^2} \frac{|z''|}{(1 + z'^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{du}{dx} - \frac{\gamma(H - z_K - z) z''}{(1 + z'^2) |z''|} (\xi z'^2 + 1) + \Gamma &= 0. \end{aligned} \right\} \text{(I8)}$$

Выбор конкретной модели зависит от потребностей пользователя и решаемых им задач, связанных с определением  $T$ ,  $\varepsilon_s$  или  $u$ .

При исследовании математических моделей рассмотрены некоторые частные случаи расположения ГТП в устойчивой части насыпи. При горизонтальном расположении в зависимости от величины  $T_1$  на ее протяжении возможно возникновение участка с предельным касательным напряжением, левая граница  $x^*$  которого удовлетворяет условиям:  $0 \leq x^* \leq l$  (рис. 5). Получена зависимость для определения  $x^*$  и формулы для вычисления характеристик напряженно-деформированного состояния прослойки и находящегося в ее окрестности грунта. Примеры эпюр  $\varepsilon_s$ ,  $\tau_{тр.в}$  и  $u$  представлены на рис. 5.

При исследовании заложения ГТП, отличного от горизонтального, рассмотрены случаи, когда проекция прослойки на плоскость поперечного сечения земполотна имеет вид отрезка круговой кривой, обращенной выпуклостью вниз и вверх.

В случае криволинейного заложения ГТП имеет место эффект обжатия грунта прослойкой, заключающийся в возникновении дополнительного нормального давления  $\sigma_{об}$  в зоне контакта ее с грунтом, величина которого определяется значением первого члена каждого из вторых уравнений систем (I3)-(I8), а направление совпадает с вектором  $\vec{v}$  (рис. 6). Если ГТП в устойчивой части насыпи расположена выпуклостью вверх, указанный эффект способствует увеличению касательных напряжений в зоне контакта нижней поверхности прослойки с грунтом, за счет чего удерживающая сила увеличивается. При расположении ГТП выпуклостью вниз эффект обжатия приводит к разгрузке нижнего слоя грунта. Давление в зоне контакта ГТП с верхним слоем грунта при этом не увеличивается, так как зависит только от собственного веса и бокового давления грунта, находящегося выше прослойки. В результате удерживающая сила уменьшается, что свидетельствует о нецелесообразности заложения прослойки в устойчивой части насыпи выпуклостью вниз.

Во всех случаях заложения прослойки исследованы зависимости  $\varepsilon_s$ ,  $T$ ,  $\sigma_s$ ,  $\tau_{тр.н}$  и  $\tau_{тр.в}$  и  $u$  от  $E_0$ ,  $\mu_y$ ,  $f_n$ ,  $f_v$ ,  $l$  и других факторов. Установлено, в частности, что при расположении прослойки в устойчивой части насыпи в виде отрезка круговой кривой, обращенной выпуклостью вверх, на ее поверхностях мобилизуются касательные напряжения большие, чем при горизонтальном заложении (рис. 7). Возникающий за счет этого выигрыш в удерживающей силе при одинаковой длине прослойки может достигать 55%. Полученные при исследовании математических моделей результаты и выводы явились теоретическими предпосылками совершенствования методики проектирования насыпей с местным армированием ГТП.

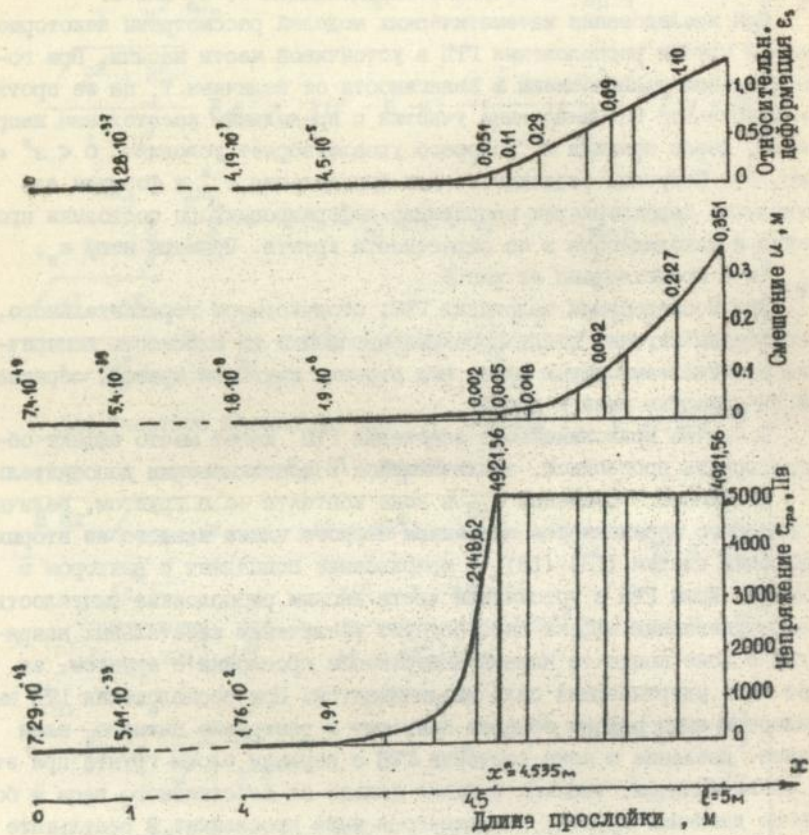


Рис. 5. Эпюры  $\epsilon_s$ ,  $u$ ,  $\tau_{гр.в}$ .

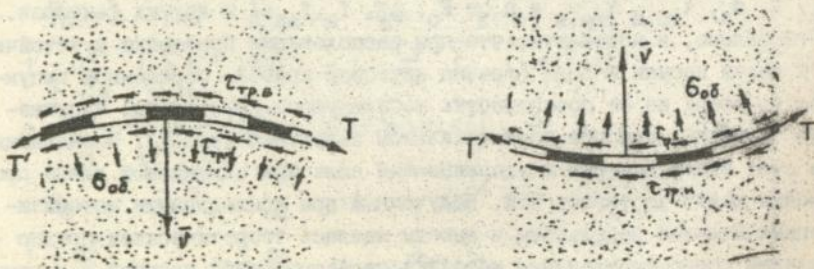


Рис. 6. Эффект обжатия грунта.

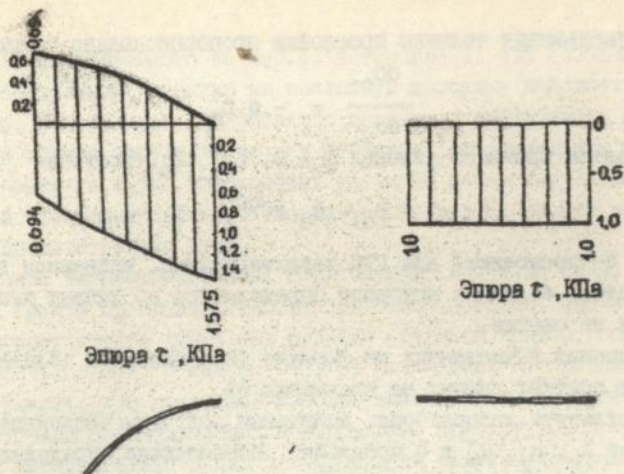


Рис. 7. Эпюры касательных напряжений при криволинейном и горизонтальном заложении прослойки.

В третьей главе приводится описание экспериментальных исследований, основной целью которых являлась проверка адекватности математических моделей процессу взаимодействия ГТП с грунтом.

Определение необходимых для расчета деформативных характеристик прослойки  $E_0$ ,  $\delta_{01}$ ,  $\mu_y$ , и  $\mu_v$  производилось при испытаниях отрезка ГТП на растяжение, при которых фиксировались растягивающая нагрузка и линейные размеры как всего отрезка, так и выделенной в центре его области, первоначальное очертание которой имело форму квадрата размерами 3 x 3 см. В качестве расчетных приняты те значения  $E_0$  и  $\mu_y$ , которые соответствуют зависимости размеров выделенной области от растягивающей нагрузки, так как на деформацию отрезка в целом оказывают значительное влияние зажимы, ограничивающие поперечную, а вместе с этим и продольную деформацию вблизи его начала и конца.

Испытания отрезка прослойки на растяжение в открытом воздухе сопровождаются уменьшением его ширины и концентрацией материала в середине отрезка, что привело к результату, обратному ожидаемому — увеличению толщины прослойки при увеличении ее длины. Это настолько искажает действительные условия работы прослойки в грунте, что определение  $\mu_v$  непосредственными измерениями и вычислениями становится невозможным. Поэтому предложен расчетный способ определения  $\mu_v$ , основанный на определении деформации сжатия прослойки из условия, что ширина ее произвольного элемента остается неизменной до и после растяжения.

Общий вид функции (9) найден исходя из предположения о том, что

степень уменьшения толщины прослойки пропорциональна толщине:

$$\frac{d\delta_{01}}{d\sigma_{\nu}} = -q \delta_{01} \quad (19)$$

С учетом краевого условия  $\sigma_{\nu} = 0$ ,  $\delta_{01} = \delta_0$ , получено

$$\delta_{01} = \delta_0 e^{-q\sigma_{\nu}}, \quad (20)$$

где  $q$  — постоянная для ГТП характеристика, названная коэффициентом сжатия, величина которого определяется по данным испытаний прослойки на сжатие.

Отклонения вычисленных по формуле (20) значений толщины прослойки от опытных данных не превышали 5%.

В результате лабораторных испытаний получены численные значения параметров  $E_0$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu_{\nu}$  и  $q$  прослойки, позволяющие определить функцию (8). Используемые при этом способы легли в основу разработки методики определения расчетных характеристик ГТП.

Исследование взаимодействия ГТП с грунтом производилось на специально изготовленном стенде, включавшем желоб призматической формы, передняя стенка которого была выполнена из стекла, и устройство для нагружения прослойки выдергивающей силой. В желобе с послойным уплотнением и укладкой прослоек возводились модели армированных конструкций земляного полотна. При помощи специального приспособления приложение выдергивающей силы осуществлялось на некотором удалении от откосов модели в толще грунта, как это имеет место в действительности.

При горизонтальном положении ГТП определяли зависимость между величиной выдергивающей силы и значениями смещений точек прослойки и находящегося в ее окрестности точек верхнего и нижнего слоя грунта, первоначальное положение которых фиксировалось метками на стекле и специально пробуренными скважинами диаметром 1,8 мм. Определение необходимых для расчетов значений касательной жесткости контакта, предварительного смещения и коэффициента трения производилось с помощью специально изготовленных устройств, одно из которых реализует признанный изобретением способ определения силы трения покоя материалов. Сравнение данных измерений и расчетов при наличии и при отсутствии трения грунта о боковые стенки стенда производилось с помощью статистических критериев, вычисленные в обоих случаях значения которых свидетельствовали об удовлетворительном совпадении данных опытов и расчетов.

Перед исследованием взаимодействия прослойки с грунтом в случаях ее расположения, отличных от горизонтального, при помощи при-

способления, изображенного на рис. 4, установлено, что особенность передачи касательной нагрузки на наклонную площадку действительно имеет место. Необходимое для расчетов значение коэффициента бокового давления грунта определялось как отношение относительных деформаций заложённых в грунт поролоновых датчиков размерами 3x3x8 см. Для условий экспериментального стенда оно оказалось весьма незначительным и принято равным нулю.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений силы, удерживающей в грунте прослойку, заложённую таким образом, что ее проекция на стенку стенда имела вид отрезка круговой кривой, обращённой выпуклостью вверх, показало, что их отклонения не превышают 12%.

Если учесть, что некоторые используемые в западноевропейских странах методики проектирования армированных конструкций предусматривают десятикратный запас прочности, то результаты сравнения опытных и расчетных данных можно считать вполне удовлетворительными, а математические модели взаимодействия прослойки с грунтом и выводы, полученные при их исследовании, следует признать пригодными для практического применения.

Четвертая глава посвящена разработке практических рекомендаций.

Разработана методика определения расчетных деформативных и прочностных характеристик ГТП по результатам лабораторных исследований. Методика заключается в выполнении измерительных и вычислительных операций, в результате которых определяются параметры  $E_0$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu_z$ ,  $\delta_0$ ,  $q$ , а также предел прочности  $\sigma_x^{пр}$  и относительная деформация при разрыве  $\epsilon_x^{пр}$  прослойки. Методика не требует применения специальных приборов, а полученные с ее помощью результаты более точно соответствуют реальным условиям взаимодействия ГТП с грунтом, чем те, которые определяются обычным способом.

Разработаны рекомендации по совершенствованию проектирования насыпей с местным армированием ГТП, относящиеся к выбору армирующего материала, ориентации ГТП в насыпи, конструированию и расчету заделки прослойки в устойчивой части земполотна.

Рекомендации позволяют запроектировать армированную насыпь так, чтобы одновременно выполнялись два условия. Первое из них состоит в том, чтобы приходящаяся на каждую прослойку выдергивающая сила не была слишком малой и обеспечивала на всем протяжении ее заделки в устойчивую часть насыпи близкие к предельному значению касательные напряжения силы трения. Иначе последние возникнут только на ограниченном участке в конце прослойки, а на остальном ее протяжении они окажутся незначительными и не будут вносить сколько-нибудь существенный вклад в величину удерживающей силы, что означает напрас-

ный расход геотекстильного материала. Второе условие заключается в том, чтобы приходящаяся на каждую прослойку выдергивающая сила не была слишком большой. Иначе возможны два нежелательных исхода. Первый из них состоит в том, что смещение в точке пересечения прослойки с поверхностью скольжения превысит значение допустимого смещения, в результате чего насыпь потеряет необходимую форму. Второй из них заключается в том, что в указанной точке относительная деформация и продольное напряжение превысят  $\epsilon_X^{пр}$  и  $\sigma_X^{пр}$ , в результате чего прослойка порвется.

С целью экономии геотекстильного материала заложение прослойки в устойчивую часть насыпи следует производить таким образом, чтобы ее проекция на плоскость поперечного сечения земляного полотна имела вид кривой линии, обращенной выпуклостью вверх. При этом следует добиваться того, чтобы угол между нормалью к поверхности прослойки и вертикалью был меньше  $\arctg f_B$ , а радиус заложения при выполнении этого условия был минимальным. Прослойка, расположенная таким образом, способна обеспечить большую удерживающую силу, чем расположенная горизонтально, за счет эффекта обжатия нижнего слоя грунта, приводящего к увеличению давления, а вместе с ним, — и к увеличению касательных напряжений в зоне контакта прослойки с нижним слоем грунта и за счет вовлечения в работу той части верхнего слоя грунта, который находится над криволинейным участком прослойки в состоянии сцепления с ней и обуславливает, из-за наклона опорной поверхности, возникновение дополнительных касательных напряжений в зоне контакта с ним верхней поверхности прослойки.

Практическая реализация рекомендаций осуществляется при помощи расчетного аппарата, в состав которого входят формулы и вычислительные программы для обоснования конструктивных параметров армированных насыпей, расчета напряженно-деформированного состояния ГТП, находящегося в ее окрестности грунта и определения технологических размеров.

Разработаны рекомендации по технологии строительства в виде технологических схем, реализующих 2 способа возведения насыпей с местным армированием ГТП с использованием распространенных средств механизации. Возможность применения каждого из предлагаемых способов зависит от технических возможностей строительной организации, геометрических размеров возводимого земляного полотна, свойств грунта, прослоек и других факторов.

Предложены нетрадиционные средства механизации в виде маркера, рабочая поверхность которого выполнена в виде конуса с криволинейными образующими, предназначенного для создания углублений в слабых грунтах при заложении прослоек и уплотнения грунта под участком за-

легания прослойки, а также в виде универсального катка, изменяемая рабочая поверхность любой формы которого создается комбинацией сменных дисков разного диаметра.

Эффективность местного армирования как способа повышения устойчивости откосов земляного полотна доказана ранее выполненными исследованиями и международной практикой дорожного строительства. Сопоставление конструктивных решений, принятых с учетом результатов исследования (связанных с уточнением расчетных деформативных и прочностных характеристик прослойки и с заложением прослойки в устойчивой части насыпи, отличном от горизонтального), показало, что они позволяют уменьшить число прослоек в 2-3 раза и получить экономию геотекстильного материала на 20-40% по сравнению с решениями, основанными на использовании известных методик проектирования насыпей с местным армированием ГТП.

В заключение следует отметить, что разработанные рекомендации не исчерпывают всей области возможного применения построенных математических моделей. С их помощью можно описывать взаимодействие ГТП с грунтом при расчете и конструировании армированных насыпей в случаях заложения прослойки самыми различными способами, в том числе в виде полуобойм и обойм. Единственное ограничение состоит в том, чтобы функция, описывающая линию, совпадающую с проекцией прослойки на плоскость поперечного сечения земляного полотна, была непрерывной вместе со своими производными до второго порядка включительно.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснованы показатели - касательная жесткость контакта и предварительное смещение, характеризующие взаимодействие геотекстильной прослойки с грунтом и установлена связь между ними. Разработаны способы и устройства для их определения. Для более точного описания напряженного состояния прослойки предложено использовать зависимость истинного продольного напряжения от относительной деформации. Разработана методика определения расчетных характеристик прослойки, соответствующих реальным условиям ее работы в армогрунтовых конструкциях.

2. Установлен и исследован эффект клина, возникающий при взаимодействии прослойки с грунтом, заключающийся в возникновении дополнительных касательных напряжений в зоне их контакта, обусловленных неравномерностью толщины прослойки при растяжении. Предложены выражения для количественного учета эффекта клина. Получено его экспериментальное подтверждение.

3. Установлена и исследована особенность передачи касательной

нагрузки на верхнюю поверхность прослойки, заключающаяся в том, что при определенном угле наклона поверхности прослойки к горизонту контакт сцепления нарушается и имеет место контакт трения. Установлены условия, при которых указанная особенность имеет место. Получено ее экспериментальное подтверждение. С учетом указанной особенности уточнена известная зависимость касательных напряжений на наклонной площадке от угла наклона в случае ее применения для грунтов.

4. С использованием принятых показателей и характеристик прослойки, с учетом эффекта клина и особенности передачи касательной нагрузки, построены математические модели взаимодействия грунта с прослойкой для случаев, когда проекция прослойки на плоскость поперечного сечения земляного полотна имеет вид произвольной прямой или кривой линии. Их использование позволяет полностью описать напряженно-деформированное состояние прослойки и находящегося в ее окрестности грунта, в том числе определять смещение любой точки их контакта, тем самым решить задачу о деформациях элементов армогрунтовой конструкции, что в пределах известного подхода к обоснованию ее конструктивных параметров было принципиально невозможно.

5. Установлен имеющий место место при криволинейном заложении прослойки эффект обжатия грунта, заключающийся в возникновении дополнительного нормального давления в зоне их контакта, обусловленного силой натяжения. Эффект позволяет мобилизовать на ее поверхностях большие, чем при горизонтальном расположении прослойки, касательные напряжения трения. При одинаковой длине прослойки выигрыш в удерживающей силе может достигать 50 и более процентов.

6. Экспериментальными исследованиями, проведенными с использованием специально изготовленных стенда и устройств, доказана адекватность математических моделей процессу взаимодействия прослойки с грунтом и справедливость принятых при их построении положений.

7. Разработаны рекомендации по совершенствованию методики проектирования насыпей с местным армированием геотекстильными прослойками, касающиеся выбора геотекстильного материала, ориентации прослойки в насыпи и обоснования конструктивных параметров с использованием программ для ЭВМ. Разработаны способы технологического осуществления рекомендаций с использованием распространенных средств механизации. Предложены нетрадиционные средства механизации.

8. Практические рекомендации дают возможность принимать технические решения, позволяющие уменьшить число прослоек в 2-3 раза и получить экономию геотекстильного материала на 20-40 % по сравнению с решениями, основанными на использовании известных методик проектирования насыпей с местным армированием геотекстильными прослойками.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Заворицкий В.И., Павлик Д.А., Кизима С.С. К вопросу о напряженно-деформированном состоянии грунтового массива с геотекстильной прослойкой. Деп. в УкрИНТЭИ 22.05.92 г. № 706-Ук.92 г., 12 с.
2. Заворицкий В.И., Иваница Е.В., Павлик Д.А. О зависимости модуля упругости грунта от жесткости боковых стенок обоймы. Деп. в УкрИНТЭИ 22.05.92 г., № 704-Ук.92, 6 с.
3. Заворицкий В.И., Павлик Д.А., Кизима С.С. Клиновыи эффект при взаимодействии геотекстильной прослойки с грунтом. Деп. в УкрИНТЭИ 13.07.92 г., № 1064-Ук.92, 7 с.
4. Заворицкий В.И., Павлик Д.А., Кизима С.С. К вопросу об оценке касательной жесткости контакта геотекстильной прослойки с грунтом. Деп. в УкрИНТЭИ 13.07.92 г., № 1063-Ук.92, 7 с.
5. Заворицкий В.И., Павлик Д.А. Математические модели взаимодействия геотекстильной прослойки с грунтом. Сб. тезисов докладов межреспубликанской научно-технической конференции "Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог". Суздаль, 1992, с.21-22.
6. Заворицкий В.И., Павлик Д.А. Уточнение расчетных деформативных характеристик геотекстильной прослойки. Сб. тезисов докладов межреспубликанской научно-технической конференции "Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог". Суздаль, 1992, с.96.
7. Способ определения силы трения покоя материалов. / Павлик Д.А., Кизима С.С., Андреев С.И., Лебедев А.С., Кизима С.С. Авт. св. № 1467456.-Опубл. в Б.И. № II 23.03.89.
8. Заворицкий В.И., Павлик Д.А. Совершенствование расчета армированных насыпей. Сб. тезисов докладов межреспубликанской научно-технической конференции "Проблемы проектирования строительства и эксплуатации местных автомобильных дорог". Минск, 1992, с. 21-22.
9. Заворицкий В.И., Павлик Д.А. Уточнение расчетных характеристик геотекстильной прослойки. Сб. тезисов докладов межреспубликанской научно-технической конференции "Проблемы проектирования строительства и эксплуатации местных автомобильных дорог". Минск, 1992, с. 59-60.

---

Подписано в печать 23.04.93. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетн.  
Офсетная печать. Усл.печ.л. 1,16. Тираж 110 экз. Зак. 937в,

---

ИПП корпорации УкрНТИ, 252171, Киев 171, ул. Горького, 180.

465281

AB 27.220

**AB 27.220**