

6 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

6.1 Назначение конструкции земляного полотна

6.2 Расчёт устойчивости откоса насыпи

6.3 Автоматизированное проектирование дорожных одежд

6.3.1 Оптимизационные методы в проектировании дорожных одежд

6.3.2 Конструктивные слои дорожных одежд

6.3.3 Критерии расчета нежестких дорожных одежд

6.1 Назначение конструкции земляного полотна

Многолетняя практика проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог выработала ряд определённых требований к геометрическим формам и конструкциям земляного полотна, что нашло отражение в типовых проектах поперечных профилей дороги. Типовые проекты заложены в базе данных любой системы автоматизированного проектирования, однако существует ряд условий, при которых ведётся индивидуальная разработка проектов поперечных профилей земляного полотна.

При проектировании поперечных профилей (назначении конструкции земляного полотна) учитывают следующие факторы [1]:

- величину рабочей отметки;
- категорию дороги;
- тип дорожной одежды;
- вид грунтов, используемых для отсыпки насыпей;
- грунтовые и гидрологические условия;
- условия водоотвода;
- ценность земельных угодий;
- требования ландшафтного проектирования;
- условия производства работ и другие.

Проектирование поперечного профиля земляного полотна включает в себя решение следующих задач:

1. Назначение заложений откосов насыпей и выемок, ширины берм и закуветных полок при высоте насыпей и глубине выемок до 12 м в благоприятных грунтовых и гидрогеологических условиях с использованием типовых решений.

2. Проектирование боковых канав и других сооружений поверхностного водоотвода.

3. Проектирование верха дороги (улицы). Оно включает в себя назначение:

- количества проезжих частей,
- ширины и уклона проезжей части,
- ширины и уклона обочин,
- параметров разделительной полосы,
- параметров бортового камня.

Пример проектирования верха дороги в программе IndorCAD/Road показан на рис.

6.1.

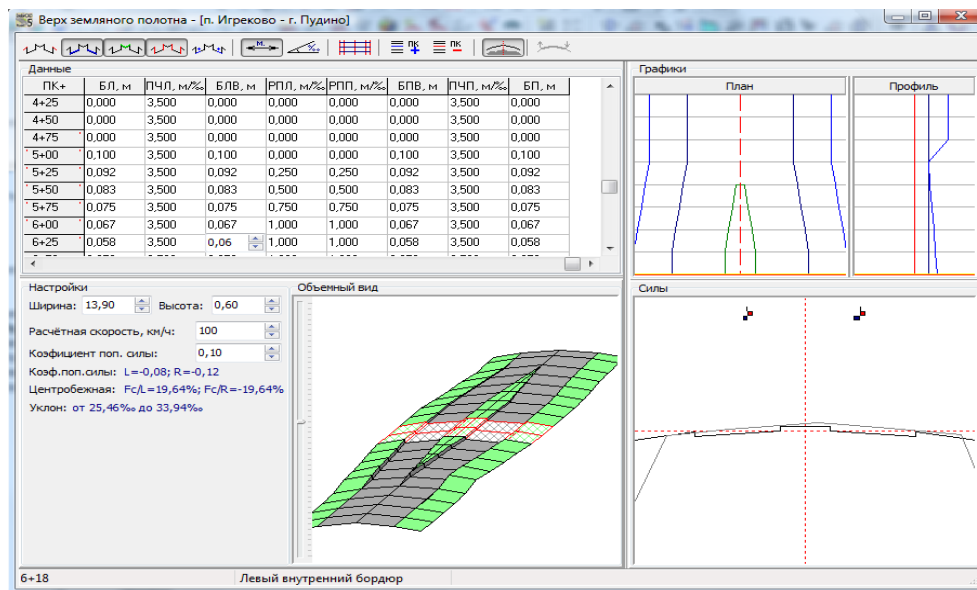


Рисунок 6.1 – Рабочее окно проектирования верха дороги в программе IndorCAD/Road

4. Индивидуальное проектирование земляного полотна. Оно проводится в случаях:

- при высоте насыпи и глубине выемки более 12 м;
- на участках временного подтопления дороги;
- для земляного полотна, возводимого из сильно набухающих глинистых грунтов;
- на дорогах, проходящих по косогорам крутизной более 1:3;
- при наличии слабых грунтов в основании насыпей;
- на дорогах, проходящих через болота глубиной более 4 м;
- при применении в конструкции земляного полотна специальных прослоек;
- при устройстве выемок со вскрытием водоносных слоёв;
- на участках с опасными геодинамическими процессами (оползнями, осыпями, обвалами, снежными лавинами и т.п.).

При индивидуальном проектировании широко используется математическое моделирование. Его целью является:

- оценка устойчивости земляного полотна в целом;
- прогноз размеров и времени неизбежных деформаций. На рис. 6.2 приведен пример распределения напряжений в насыпи и её основании, полученных в результате математического моделирования.

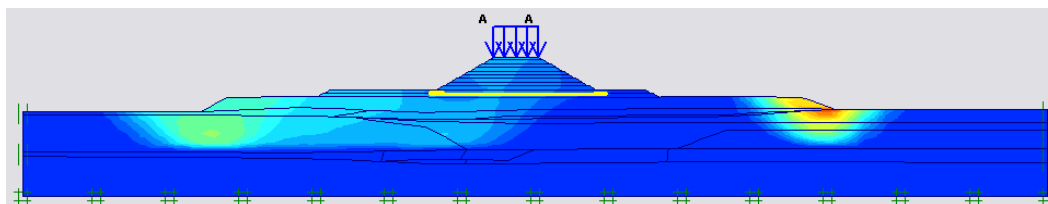


Рисунок 6.2 – Прогноз деформаций насыпи на слабом основании

В качестве примера индивидуального подхода к проектированию поперечного профиля рассмотрим задачу оценки устойчивости откоса насыпи.

6.2 Расчёт устойчивости откоса насыпи

Пусть требуется запроектировать насыпь высотой более 12 м. Проектировщиком задаются параметры поперечного профиля, т.е. высота, ширина земляного полотна b и крутизна откоса. Как правило, высокие насыпи имеют откосы переменной крутизны (рис. 6.3). Верхняя часть насыпи имеет крутизну $1:m$, а нижняя часть – уположение на четверть, т.е. $1:(m+0,25)$.

Устойчивость откоса насыпи оценивают сопоставлением расчётного *коэффициента устойчивости* k_p с его нормативным значением k_n . Устойчивость откоса обеспечена, если выполнено условие

$$k_p \geq k_n. \quad (6.1)$$

Коэффициент устойчивости определяют по методу *круглоцилиндрических поверхностей*. Его суть – проектировщик задаёт поверхность обрушения в виде дуги окружности радиуса R и оценивает устойчивость грунтового массива, представляющего собой в пространстве цилиндр, основаниями которого являются сегменты круга радиусом R .

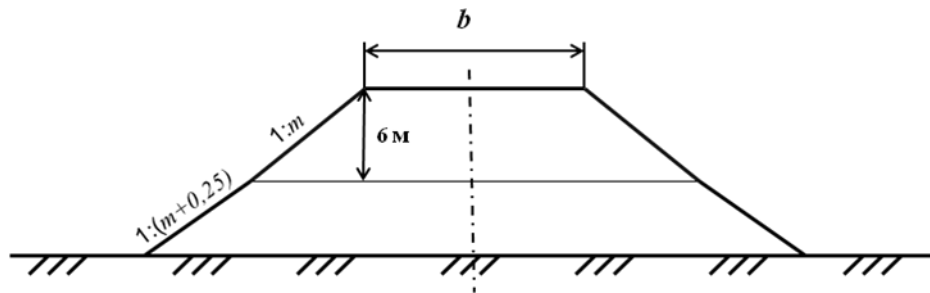


Рисунок 6.3 – Поперечный профиль высокой насыпи с откосом переменной крутизны

Из условия равновесия сил, приложенных к грунтовому массиву обрушения, строятся 3 уравнения статики. Число неизвестных в задаче, как правило, больше трёх, поэтому для замыкания задачи, используют различные допущения и инженерные формулы. В зависимости от принимаемых допущений получают различные модификации метода круглоцилиндрических поверхностей.

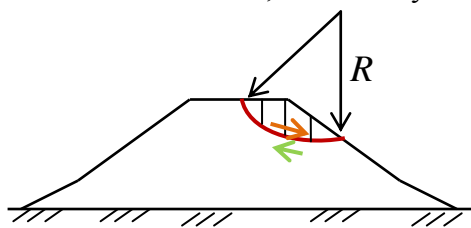


Рисунок 6.4 – Массив обрушения

Массив обрушения разбивают на элементарные грунтовые столбики достаточно малой ширины, такой, чтобы дуги скольжения можно было заменить отрезками – хордами этих дуг. Рассмотрим один элемент под номером i . Он имеет ширину b_i (рис. 6.5). Отрезок скольжения образует угол α_i с горизонтальной плоскостью – осью координат x .

На элементарный столбик грунта действует сила P_i , обусловленная весом грунта. Элементарный столбик пытается сдвинуть сила E_i – проекция силы P_i на отрезок скольжения:

$$E_i = P_i \sin \alpha_i. \quad (6.2)$$

Удерживающие силы (силы трения) для каждого столбика определяют по закону Кулона:

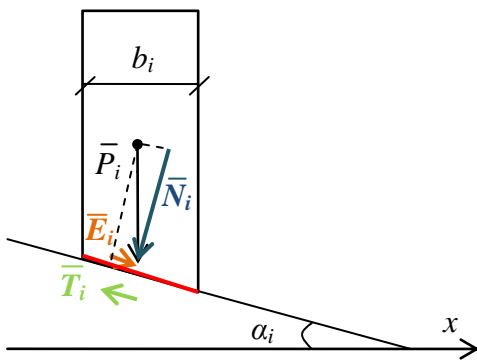


Рисунок 6.5 – Расчётная схема

$$T_i = N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i, \quad (6.3)$$

где N_i – равнодействующая эпюры нормальных к поверхности скольжения напряжений; φ_i , c_i – угол внутреннего трения и сцепление грунта в i -м элементе соответственно; l_i – длина отрезка скольжения, определяемая по формуле

$$l_i = \frac{b_i}{\cos \alpha_i}. \quad (6.4)$$

Всё разнообразие методов круглоцилиндрических поверхностей заключается в различных способах задания силы N_i . Самый простой и самый ранний – это способ Терцаги, в котором сила задаётся формулой

$$N_i = P_i \cos \alpha_i. \quad (6.5)$$

Момент сдвигающих сил определится по формуле

$$M_{сдв,i} = E_i \cdot R, \quad (6.6)$$

а момент удерживающих сил –

$$M_{уд,i} = -T_i \cdot R. \quad (6.7)$$

Коэффициент устойчивости строится, как отношение суммы моментов удерживающих сил к сумме моментов сдвигающих сил

$$k_p = \frac{\left| \sum_{i=1}^n M_{уд,i} \right|}{\left| \sum_{i=1}^n M_{сдв,i} \right|}, \quad (6.8)$$

где n – количество элементов в массиве обрушения.

В 60-е годы 20 века было проведено большое количество сопоставительных расчётов, сделанных для одних и тех же объектов, но выполненных разными модификациями метода круглоцилиндрических поверхностей. Результаты показали, что для большинства объектов различие в результатах расчётов меньше погрешностей в определении исходных характеристик грунтов.

Преимущество автоматизированного расчёта заключается в том, что можно перебрать очень большое количество кривых, моделирующих поверхность обрушения, и выбрать несколько наиболее опасных из них, а также рассмотреть большое количество элементарных столбиков, учитывающих неоднородность грунта.

6.3 Автоматизированное проектирование дорожных одежд

6.3.1 Оптимизационные методы в проектировании дорожных одежд

Дорожная одежда, по которой происходит движение автотранспорта, является одним из наиболее дорогих и ответственных элементов автомобильной дороги. Её строительная стоимость составляет от 40 до 60 % от стоимости всей дороги. В связи с этим, оптимальное

проектирование дорожной одежды является одной из актуальнейших проблем строительства. Выделяют 3 уровня оптимизационных методов проектирования дорожных одежд.

Первый уровень – оптимизация конструкции дорожной одежды, т.е. оптимизируются факторы на стадии проектирования дорожной одежды. На этом уровне разрабатывают несколько вариантов дорожной одежды. Для каждого варианта строят целевую функцию K_i – строительную стоимость i -го варианта дорожной одежды и оптимальным считается тот вариант, для которого целевая функция принимает минимальное значение

$$K^* = \min(K_1, K_2, \dots, K_n), \quad (6.9)$$

где n – количество рассматриваемых вариантов.

Второй уровень – конструкция дорожной одежды оптимизируется с учётом:

- длины трассы,
- протяжённости насыпей и выемок,
- гидрологических условий,
- местоположения источников получения местных дорожно-строительных материалов,
- размещения производственных баз,
- местоположения станций доставки привозных материалов.

На этом уровне уже удаётся реализовать системный подход к процессу проектирования и строительства всей автомобильной дороги. Данный уровень был реализован в советские годы в Ташкентском автодорожном институте [2].

Третий уровень – создаётся единая система проектирования, строительства и эксплуатации дорожных покрытий. Производится оптимизация ресурсов, выделяемых на строительство и эксплуатацию дорог в пределах данного региона. Такой уровень реализован за рубежом, например, в Канаде, Нидерландах [2].

6.3.2 Конструктивные слои дорожных одежд

По механическим свойствам все дорожные одежды делят на *жёсткие* (сопротивляющиеся изгибу) и *нежёсткие* (слабо сопротивляющиеся изгибу).

Проектирование дорожной одежды включает в себя два этапа: её *конструирование* и *расчёт сформированной конструкции по критериям прочности и устойчивости*.

Дорожные одежды состоят из конструктивных слоёв различного назначения, прочность которых убывает с глубиной в соответствии с уменьшением напряжений от подвижной нагрузки. В общем случае в конструкции дорожной одежды различают следующие слои (рис. 6.6):

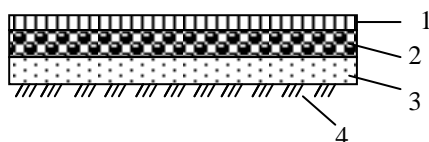


Рисунок 6.6 – Конструктивные слои дорожной одежды

требования. Это самый дорогой материал;

- *основание* (несущий слой) (2), представляемое одним или несколькими конструктивными слоями. Оно воспринимает в основном вертикальные нагрузки от подвижного состава. Для слоёв основания применяют материал менее прочный, чем для покрытия;

6.6):

- *покрытие* (1), подверженное непосредственному воздействию колёс автомобилей, а также климатических и атмосферных факторов. К материалу покрытия предъявляются наиболее жёсткие

- *дополнительный слой основания* (3), устраиваемый из несвязного грунта с высоким коэффициентом фильтрации. Он выполняет функции морозозащитного, дренирующего и выравнивающего слоя;

- *грунт земляного полотна* (4). От свойств и прочности его во многом зависит надёжность всей конструкции в целом.

6.3.3 Критерии расчета нежестких дорожных одежд

При расчётах нежестких дорожных одежд должны соблюдаться следующие критерии прочности и устойчивости:

1. *По допустимому (упругому) прогибу*. Конструкция проверяется на прочность по критерию:

$$\frac{E_{\text{общ}}^i}{E_{\text{тр}}} \geq K_{\text{пр}}, \quad (6.10)$$

где $E_{\text{общ}}^i$ - общий модуль упругости на поверхности i -го слоя дорожной одежды; $E_{\text{тр}}$ - требуемый модуль упругости, зависящий от расчётной интенсивности нагрузки; $K_{\text{пр}}$ - коэффициент прочности, который должна иметь дорожная одежда к концу межремонтного периода.

2. *Расчёт на сдвиг грунта земляного полотна и малосвязных конструктивных слоёв дорожной одежды*. В качестве критерия устойчивости против сдвига принято условие:

$$\frac{T_{\text{доп}}}{T_{\text{мах}}} > K_{\text{пр}}, \quad (6.11)$$

$T_{\text{доп}}$ - допустимое напряжение сдвига грунта, $T_{\text{мах}}$ - максимальное сдвигающее напряжение от расчётной нагрузки.

3. Монолитные слои конструкции (асфальтобетон, материалы, обработанные вяжущим) рассчитывают *на прочность при изгибе* по критерию

$$\frac{R_u}{\sigma_r} > K_{\text{пр}}, \quad (6.12)$$

где R_u - предельно допустимое растягивающее напряжение для материала монолитного слоя, σ_r - наибольшее растягивающее напряжение в монолитном слое.

4. *Расчёт дорожной одежды на морозоустойчивость* (зимнее пучение) осуществляется по критерию

$$l_{\text{доп}} \geq (l_{\text{пуч}} + l_{\text{мз}}), \quad (6.13)$$

где $l_{\text{доп}}$ - допустимая величина вспучивания покрытия, $l_{\text{пуч}}$ - расчётная величина пучения грунта земляного полотна, $l_{\text{мз}}$ - расчётная величина пучения материала морозозащитного слоя.

В качестве критерия оптимальности (целевой функции) примем строительную стоимость одного погонного метра (1 пм) дорожной одежды

$$K_{до} = \sum_{i=1}^m h_i \cdot K_i \rightarrow \min, \quad (6.14)$$

где h_i – толщина i -го конструктивного слоя, K_i – удельная стоимость 1 пм материала i -го слоя дорожной одежды [руб. /м].

При автоматизированном расчёте слоёв дорожной одежды достигаются следующие экономические эффекты:

- ускорение процесса проектирования и снижение стоимости проектных работ;
- исключение ошибок в расчётах;
- снижение стоимости строительства дорожной одежды на 5-18%.

Всё это позволяет снизить стоимость строительства автомобильной дороги от 3 до 10 %.

Для автоматизированного проектирования дорожной одежды используют программы РАДОН и Indoravement.

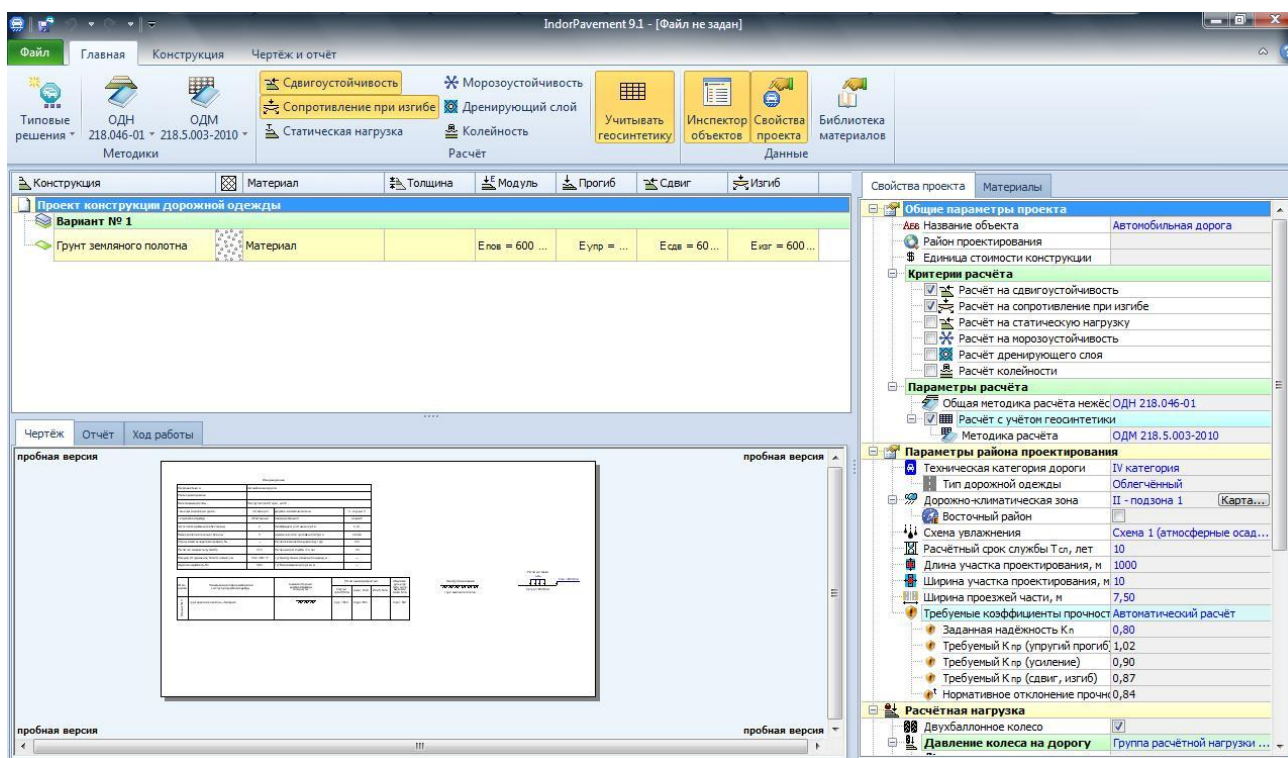


Рисунок 6.7 – Рабочая среда программы Indoravement 9

Источники информации

1. Федотов, Г.А. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. В 2 кн. Кн.1: Учебник / Г.А. Федотов, П.И. Пospelов. – М.: Высш. шк., 2009. – 646 с.
2. Федотов, Г.А. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог / Г.А. Федотов. – М.: Транспорт, 1986. – 317 с.