

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОРОЗОУСТОЙЧИВОСТИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Булхаирова Сагдат Ибрагимовна

студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», РФ, Омск

Кузнецова Вероника Вячеславовна

студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», РФ, Омск

PROVISION OF FROST RESISTANCE OF ROAD CONSTRUCTIONS

Sagdat Bulkhairova

student, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «The Siberian State Automobile and Highway University», Russia, Omsk

Veronica Kuznetsova

student, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «The Siberian State Automobile and Highway University», Russia, Omsk

Аннотация. В статье предлагается рассмотреть порядок назначения несущих слоев оснований дорожных одежд из грунтов обработанных неорганическими вяжущими (использованием суглинистых грунтов). Наличие оснований из укрепленных грунтов работают по принципу плиты позволяют снизить толщину дорожной одежды и повысить ее морозоустойчивость. Это позволяет обеспечить прочность дорожной конструкции и ее морозоустойчивость. Наличие цементогрунтовой плиты исключает неравномерное пучение и обеспечивает прочность асфальтобетонных слоев к образованию сетки трещин.

Abstract. The article proposes to consider the procedure for assigning bearing layers of pavement bases from soils treated with inorganic binders (using loamy soils). The presence of bases from fortified soils work on the principle of the slab allows to reduce the thickness of the road clothes and increase its frost resistance. This allows you to ensure the strength of the road structure and its frost resistance. The presence of a cement and soil slab eliminates uneven study and ensures the strength of asphalt concrete layers to the formation of a grid of cracks.

Ключевые слова: цементогрунт; столб пучения; плита; дорожная одежда.

Keywords: cement ground; heaving column; plate; road pavement.

Введение. Обеспечить повышенную долговечность нежестких дорожных одежд в условиях Западной Сибири является наиболее сложной задачей при проектировании дорожных одежд. Главная причина в том, что местные грунты на больших территориях представлены пылеватыми разновидностями глинистых грунтов. При продолжительном зимнем периоде и близком залегании грунтовых вод создаются благоприятные условия пучинообразования [2]. Это ещё усугубляется тем, что на значительных территориях затруднен поверхностный водоотвод. Можно было бы устраивать дренажные слои в земляном полотне, но отсутствие песков, пригодных для дренирования затрудняет этот способ водоотвода.

Пучинообразование возникает при зимнем промерзании пучинистых грунтов. Начинается образование пучины – её зарождение от поверхности земляного полотна. Замерзший верхний слой грунта создает конденсацию водяного пара находящегося в порах грунта на охлажденной поверхности. При замерзании вода увеличивается в объеме. Чаще всего вода заполняет поры грунта, где имеется малый размер мениска. К этой зоне происходит дополнительное подтягивание водяного пара, который конденсируется и превращается в свободную воду. Причем эта влага распределена между грунтовыми частицами неравномерно. Создаются центры конденсации и центры промерзания. Замерзшая вода начинает расширяться и создает тем самым еще капилляры, по которым уже перемещается свободная, но ещё незамерзшая вода [5]. Это приводит к дополнительному льдообразованию.

При близком залегании грунтовых или поверхностных вод образующиеся капилляры из замерзшей воды в грунте притягивают свободную воду и этот процесс максимально продолжается, чем медленнее идет промерзание грунта. Один из способов снижения пучиннообразования – это создания гидроизолирующего слоя в грунте на пути перемещения воды по капиллярам и насыщенного пара [10].

Вода, застаивающаяся на поверхности дороги или в боковых канавах, вследствие затрудненного поверхностного стока 2 может достигнуть грунта земляного полотна в результате действия пленочного или капиллярного механизма передвижения влаги. Следует отметить, что капиллярная вода в зимнее время является основным источником льдонакопления в грунтах земляного полотна

Уменьшить пучинообразование можно и за счет ускоренного промерзания грунта. Чем быстрее идет промерзание, тем меньше потянется воды к зоне промерзания.

Предлагается рассмотреть механизм пучинообразования при воздействии повышенной нагрузки на слой грунта.

В расчетной схеме пучинообразования рассмотрим верхние слои дорожной одежды, устроенный из монолитного материала – асфальто- или цементобетона. Эти слои можно представить как плита, лежащая на упругом основании. При пучении грунта возникает бугор пучения, который будет стремиться поднять эту плиту. Если прочность этой плиты будет достаточно большой, то силы пучения не смогут поднять эту плиту. При недостаточной прочности на поверхности этого слоя будут образовываться бугры пучения.

В весеннее время, при оттаивании дорожной одежды и верхнего слоя земляного полотна происходит излишнее водонасыщение грунта и снижение его прочности. При воздействии колес автомобилей возникают большие просадки и разрушение дорожной одежды [11].

Рассмотрим полосу дорожной одежды шириной 1 м. По этой полосе движется груз. В общем случае пусть груз P движется с постоянной скоростью V по полосе. Особенностью данной задачи является независимость величины прогиба полосы под грузом от положения груза на полосе – стационарная задача. Вертикальная координата груза остаётся постоянной при движении по горизонтальному участку полосы и вертикальное ускорение груза равно нулю.

В качестве основания примем коэффициент постели как наиболее простую схему. В защиту этой модели основания служат факты, что в расчетный период года – весной, прогибы покрытия под нагрузкой имеют максимальное значение, а грунт под полосой (дорожной

одеждой) оттаивает на глубину 50 - 70 см. Т.е. значение коэффициента постели k в этом случае имеет физический смысл - ограниченная мощность слоя сжатия, поскольку ниже этого слоя грунт находится в весеннее время в замерзшем состоянии - несжимаемый слой.

В зависимости от значения показателя гибкости t полоса относится к одной из следующих расчетных категорий [3]:

- а) при $t < 1$ полоса с достаточной точностью может считаться абсолютно жесткой и относиться к категории жестких полос;
- б) при $1 < t < 10$ полоса рассчитывается как имеющая конечную длину и конечную жесткость и относится к категории коротких полос ;
- в) при $t > 10$ полоса с достаточной точностью может считаться бесконечно длинной и относиться к категории длинных полос.

Имеем типовое уравнение изгиба полосы, лежащей на упругом основании

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = -m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - ky, \tag{1}$$

В правой части уравнения имеем инерционную составляющую основания и реакцию упругого основания. Для решения поставленной задачи примем условие, что пучина воздействует на полосу снизу и реакция системы на пучина складывается из сил упругого изгиба полосы и веса поднявшейся части полосы от пучины. Второй член уравнения представляет статическую нагрузку от веса полосы, а реакция основания равна 0.

Для выполнения практических расчетов воспользуемся примером № 2 из МОДН-2. [7]

Имеем конструкцию дорожной одежды, характеристика которой представлена в таблице 1.

Таблица 1.

Конструкция дорожной одежды

Материал	k слоя, см	E , МПа, при расчете по		Расчет на растяж изгибе			
		допустимому упругому прогибу	условию сдви гоустойчивос ти	E , МПа	R_0	МПа	
Асфальтобетон плотный на битуме марки БНД 90/130	4	2400	1200	3600	9	50	
То же, пористый	8	1400	800	2200	7	80	
То же, высокопористый	15	1400	800	1700	5	50	
ЩГПС C_3	30	280	280	280	-		
Песок средней крупности	30	120	120	120	-		
Супесь пылеватая $W_p = 0,785$ W_m	-	34	34	34	-		

Будем считать, что асфальтобетонные слои, работающие на изгиб являются монолитными слоями плиты, которая лежит на упругом основании. В данном примере толщина плиты составляет толщина асфальтобетонных слоев

$$h = 0,04 + 0,08 + 0,15 = 0,3 \text{ м.}$$

Средневзвешенный модуль упругости плиты составит:

$$E_1 = (3600 \cdot 0,04 + 2200 \cdot 0,08 + 1700 \cdot 0,15) / 0,3 = 1924,6 \text{ МПа.}$$

Модуль упругости основания $E_0 = 140 \text{ МПа.}$

Для определения вида плиты воспользуемся показателем гибкости t из книги, в которой приведен расчет конструкций на упругом основании, Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А.

Полудлина плиты l равна ширине полосы движения, толщина плиты h равна толщине а/б слоев, модуль упругости материала полосы E_1 , модуль упругости грунта E_0 . В качестве полудлины полосы примем половину ширину проезжей части - одна полоса движения.

Показатель гибкости плиты [3]

$$t = 10 \frac{E_0}{E_1} \cdot \frac{l^3}{h^3} = 10 \frac{140}{1924,6} \cdot \frac{3,5^3}{0,3^3} = 1155 \text{ .}$$

Так как $t > 10$, то это позволяет считать, что плита относится к категории бесконечно длинных. И уравнения поверхности плиты (1) представляется в виде синусоиды с экспоненциально затухающей амплитудой [1].

Изгибная волна имеет симметричную форму относительно груза [1].

$$w = \frac{P e^{-\alpha x}}{2 E J (\alpha^2 + \beta^2) \alpha \beta} (\alpha \cdot \sin \beta x + \beta \cdot \cos \beta x) \text{ .} \quad (2)$$

Рассмотрим часть уравнения в скобках для одной полуволны изогнутой поверхности. Нас интересует: на каком расстоянии от нагрузки прогиб плиты будет равен 0 т.е.

$$(\alpha \cdot \sin \beta x + \beta \cdot \cos \beta x) = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения имеет вид [8]

$$l = \frac{3\pi}{4} \sqrt[4]{\frac{8 B}{k}} \text{ .} \quad (4)$$

где k - коэффициент постели основания, при известном модуле упругости слоев дорожной одежды под асфальтобетонном покрытием (E_0) можем найти как

$$k = \frac{E_0}{H (1 - \mu_0^2)} \quad (5)$$

где H - толщина активной зоны, H=1,5 - 0,3=1,2 м

$$k = \frac{140}{(1,5 - 0,3)(1 - 0,35^2)} = 132,9 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \quad (6)$$

Поскольку рассматриваем изгиб дорожного покрытия, то покрытие можно представить балочным набором или набором полос. В месте приложения силы будем считать, что изгибная жесткость покрытия равна D. При таком допущении при сравнении точных решений Б.В. Дидова, данного в книге Горбунова-Пасадова [3] размер чаши деформирования составляет 4 упругих характеристики С

$$C = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} \quad C = \sqrt[4]{\frac{4,93}{132,9}} = 0,439 \text{ м} \quad (7)$$

Цилиндрическая жесткость покрытия

$$D = \frac{Eh^3}{12 (1 - \mu^2)} = \frac{1924,6 \cdot 0,3^3}{12 (1 - 0,35^2)} = 4,93 \text{ МН}\cdot\text{м} \quad (8)$$

При использовании модели основания в виде полупространства

Для расчета длинных полос необходимо знать её характеристику

$$L = h \sqrt[3]{\frac{E_1}{6 E_0}} = 0,3 \sqrt[3]{\frac{1924}{6 \cdot 140}} = 0,395 \text{ м}$$

Разница между упругой характеристикой, найденной для упругого полупространства составляет:

$$\Delta = \frac{0,439 - 0,395}{0,439} 100 = 10,0 \%$$

Расстояние от груза до точки покрытия, где прогиб равен нулю (рис. 1) составляет

$$l = \frac{3\pi}{4} \sqrt[4]{\frac{8B}{k}} = \frac{3 \cdot 3,14}{4} \sqrt[4]{\frac{8 \cdot 4,93}{132,9}} = 1,74 \text{ м}$$

Расстояние от груза до точки покрытия, где прогиб равен нулю составляет 4 упругих характеристики плиты. Можем считать, что это довольно хорошее совпадение.

Поскольку на таком расстоянии от груза прогиб равен нулю, то на таком расстоянии от центра пучины покрытие сохранит первоначальное положение. Зона пучения равна $2l$.

Расчетная схема пучения покрытия приведена на рис. 1. F - сила подъема покрытия.

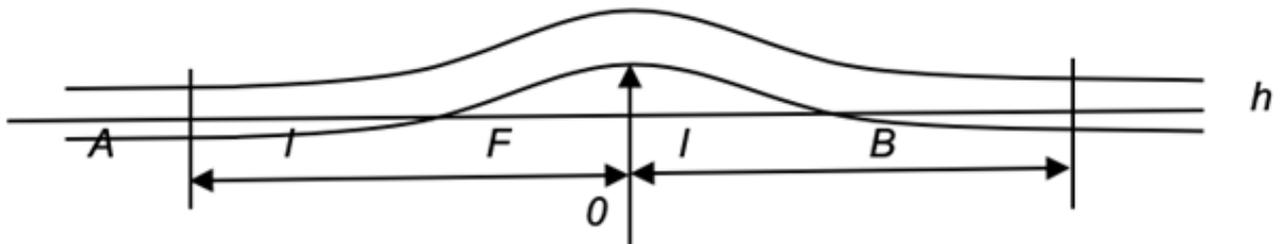


Рисунок 1. Расчетная схема воздействия пучины на покрытие

В точке O возникает пучина, которая поднимает полосу на величину $h_{пуч}$. Как следует из рис. 1 зона действия пучины распространяется на расстояние $\pm l$ и размер этой зоны не зависит от высоты пучины $h_{пуч}$, а только от упругой характеристики полосы. В пределах участка AB отсутствует контакт плиты с упругим основанием кроме точки O , поскольку мы рассматриваем неравномерное пучение, локальная пучина вызовет изгиб покрытия под действием силы пучения R .

Нас интересует кривизна в вершине пучины, где покрытие поднялось на максимальную высоту $h_{пуч}$.

Можно считать, что кривизна участка пучения меняется на расстоянии $l/2$ и центральную зону можно предварительно принять в виде сферы радиусом R .

Радиус этой сферы найдем, как

$$R = \frac{h_n^2 + \frac{l^2}{4}}{2h_n} \quad (9)$$

где h_n - величина пучения.

Величина поднятия плиты определяется величиной пучения грунта земляного полотна. Согласно СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги Таблица В.8 максимальную величину пучения имеет супесь тяжелая пылеватая, суглинок легкий пылеватый - 10 % при глубине промерзания грунта ниже дорожной одежды 1,5 м, т.е максимальная величина пучения

составляет 15 см при мощности пучинистого грунта 1,5 м. На эту величину может подняться поверхность покрытия [4,6], При этом радиус кривизны покрытия составит

$$R = \frac{0,15^2 + \frac{1,754^2}{4}}{2 \cdot 0,15} = 2,60 \text{ м}$$

Центр сферы находится на глубине 2,65 м от поверхности покрытия, или на глубине $2,65 - 0,87 = 1,78$ м. Согласно СП 34.1333 рабочий слой земляного полотна составляет не менее 1,5 м от земляного полотна. При толщине дорожной одежды 0,87 м центр находится на глубине промерзания грунта.

Максимальная величина пучения в годовом цикле достигает в середине зимы, при максимальной глубине промерзания. В соответствии с ОДН 218046 расчетная глубина промерзания грунта составит (для данного района)

$$z_{пр} = z_{пр(ср)} \cdot 1,38 = 2 \cdot 1,38 = 2,76 \text{ м}$$

Различия между полученными и расчетными значениями не превышают $(2,76 - 2,65) \cdot 100 / 2,65 = 4,16\%$.

Такая точность позволяет сказать, что различия вполне допустимы.

Таким образом, центр пучения находится именно на такой глубине 2,76 м.

Так как длина изогнутой поверхности равна 1,74 и представляет собой синусоиду, то растягивающее напряжение в верхнем слое покрытия будет действовать на расстоянии 1/3 от центра нагружения составит 0,58 м, то зона выпирания пучины составит 1,16 м.

При таком радиусе кривизны относительная деформация покрытия может быть найдена как

$$\varepsilon = \frac{h}{2R} \quad (10)$$

где h - толщина покрытия.

При толщине верхнего слоя покрытия принятого в примере $h = 0,04$ м, относительная деформация составит:

$$\varepsilon = \frac{0,04}{2 \cdot 2,60} = 0,0077$$

При известном модуле упругости E материала покрытия можем найти растягивающие напряжения при изгибе

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (11)$$

Для рассматриваемого покрытия $E = 3600$ МПа имеем

$$\sigma = 0,0077 \cdot 3600 = 27,72 \text{ Мпа,}$$

что значительно превышает предел прочности на растяжение при изгибе, равном при 0°C , $R_0 = 9,5$ МПа. Т.е. при данных условиях покрытие будет при пучении растрескиваться.

Введем в состав плиты ещё один слой из грунта, укрепленного цементом с маркой прочности М-60. Толщину слоя назначим 30 см. Модуль упругости слоя составит $E=700$ МПа.

Коэффициент постели при исключении слоя из ПГС и уменьшении толщины песка на 4 см найдем, как

$$k = \frac{62,4}{(1,5 - 0,3)(1 - 0,35^2)} = 59,8 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \quad (6)$$

Модуль упругости полосы

$$E_1 = (3600 \cdot 0,04 + 2200 \cdot 0,08 + 1700 \cdot 0,15 + 700 \cdot 0,34) / 0,3 = 1270,3 \text{ МПа.}$$

Цилиндрическая жесткость

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} = \frac{1270,3 \cdot 0,04^3}{12(1 - 0,35^2)} = 31,62 \text{ МН}\cdot\text{м}$$

Упругая характеристика составит

$$l = \frac{3\pi}{4} \sqrt[4]{\frac{8B}{k}} = \frac{3 \cdot 3,14}{4} \sqrt[4]{\frac{8 \cdot 31,62}{56,7}} = 3,38 \text{ м}$$

При этом радиус кривизны покрытия будет равен

$$R = \frac{0,15^2 + \frac{3,38^2}{4}}{2 \cdot 0,15} = 9,53 \text{ м}$$

При таком радиусе кривизны относительная деформация покрытия может быть найдена как

$$\varepsilon = \frac{h}{2R} = \frac{0,04}{2 \cdot 9,53} = 0,0021$$

Растягивающие напряжения в верхнем слое покрытия составят

$$\sigma = 0,0021 \cdot 3600 = 7,6 \text{ МПа.}$$

Поскольку фактические изгибающие напряжения в верхнем слое покрытия не превышают допустимых, то этим гарантируется прочность покрытия.

Заключение. Выполненный расчет показывает, что устройство основания из грунта, укрепленного цементом позволяет обеспечить прочность покрытия и исключить образование пучин. Кроме того, наличие укрепленного основания снижает теплопроводность дорожной одежды, что в конечном счете приведет к обеспечению прочности дорожной конструкции. Растягивающее напряжение при устройстве основания из цем грунта составит 7,6 МПа, что

говорит об уменьшении напряжения в 4 раза по сравнению со слоем из ЩПГС. Поэтому применять на пучиноопасных участках целесообразно использовать цементогрунты.

Гарантировать прочность дорожной одежды с учетом продления её срока службы до 24 лет в соответствии с ПНСТ 265-2018 можно при обязательном обеспечении первой расчетной схемы увлажнения грунта земляного полотна.

При отсутствии качественных грунтов целесообразно использовать в качестве слоя основания золошлаковых смесей укрепленных цементом.

Список литературы:

1. Пановко Я.Г, Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем. Современные концепции, парадоксы и ошибки. – 4-е изд., перераб. – М. : Наука. ГЛ. ред. физ.-мат. Лит. 1987. – 352 с.
2. Леонович И.И. Вырко Н.П. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. Пособие для студентов специальности 1-70 03 «Автомобильные дороги». Учебное электронное издание. Белорусский национальный технический университет. Минск. 2013.
3. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А. Расчет конструкций на упругом основании. Изд. 2-е, перераб. и доп. Стройиздат. 1973. – 627 с.
4. Цитович Н.А. Механика грунтов (краткий курс) Учебник для строит. Вузов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. шк. 1983. – 288 с..
5. Сиденко В.М. Расчет и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна. Автотрансиздат. 1962. – 116 с.
6. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Дата введения 2013 -07-01.
7. МОДН 2-2002. Проектирование нежестких дорожных одежд. Дата введения 2001-04-15
8. Малофеев, А.Г. Проектирование аэродромных покрытий / А.Г. Малофеев, Г.М. Левашов, В.В. Сиротюк // СиБАДИ. – 2018. – 81 с.
9. Васильев, Ю.М. Оценка пучинистости грунтов при замерзании / Ю. М. Васильев // Труды Союздорнии. - 1970. – Вып.37. – С. 147-155.
10. Пузаков, Н.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог / Н.А. Пузаков. – М.: Автотрансиздат, 1960. – 166 с.
11. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / под. ред. И.А. Золоторя, Н.А. Пузакова, В.М. Сиденко. – М.: Транспорт, 1971. – 416 с.