

УДК 630.383

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

Т.В. Скворцова, Е.В. Кондрашова

Общая расчетная схема дорожной одежды нежесткого типа применительно для ЭВМ (рисунок 1) включает девять конструктивных слоев дорожной одежды и грунтовое полупространство. Конструктивными слоями являются: 1 – покрытие усовершенствованного типа, устраиваемое преимущественно из плотного асфальтобетона; 2 – верхний слой основания, устраиваемый чаще всего из пористого или высокопористого асфальтобетона; 3 – покрытие облегченного типа либо при наличии слоя 2 – слой основания; слой 3 устраивают из материалов, обработанных органическим вяжущим; 4 – 9 – слои основания, которые устраиваются из следующих материалов: 4 – из щебеночных материалов, шлакового щебня; 5 и 6 – из материалов и грунтов, укрепленных цементом или другим неорганическим вяжущим.

1. Если в конструкции имеется всего один слой из материала, укрепленного цементом, то слою присваивают индекс 5; 7 – из местных неукрепленных мало–прочных каменных материалов (гравий, щебень, гравийные, щебеночные и гравийно-щебеночно-песчаные смеси, в которых содержится или может образоваться в процессе строительства и эксплуатации основания избыточное по сравнению с действующими нормами количество мелких частиц с числом пластичности до 7; природные или искусственно составленные смеси с содержанием зерен гравия (щебня) крупнее 5 мм не менее 20 %; щебень из осадочных пород марок по дробимости 400, 300 и 200; щебень из изверженных и метаморфических пород марки по дробимости 600, дресва, опоки, грунто–щебень и др.); 8 – из песков крупных, гравелистых, средней крупности или мелких; 9 – из грунтов, укрепленных жидким органическим вяжущим.

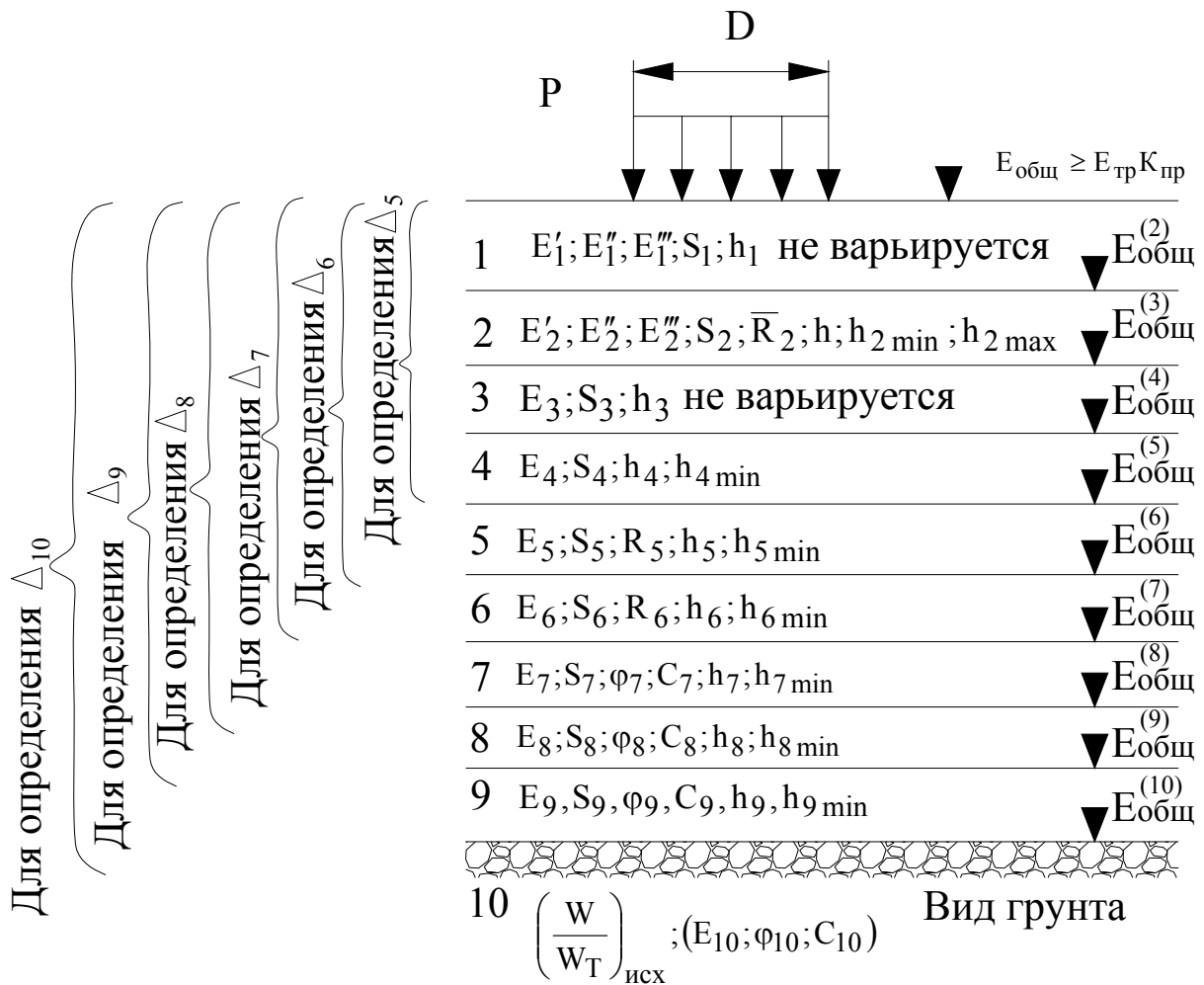


Рисунок 1 – Расчетная схема дорожной одежды нежесткого типа для ЭВМ

2. Слои 2, 5 и 6 рассчитывают на растяжение при изгибе, слои 7, 8 и 9 из слабо-связных материалов и грунтовое полупространство 10 – исходя из условия недопущения сдвига. Проверять напряженное состояние слоев 1 и 3 обычно нет необходимости: надежность этих материалов, если они отвечают современным техническим требованиям, в достаточной мере доказана практикой. Не проверяют расчетом также возможность возникновения сдвига в слое 4.

3. Расчетной схемой предусматривается, что толщины слоев 1 и 3 назначаются по конструктивным соображениям и в процессе расчета не изменяются. Толщины остальных слоев варьируют в зависимости от расчетных характеристик материалов и грунта, а также от затрат на устройство слоев. В процессе варьирования толщина слоя не должна назначаться ниже минимальной конст-

руктивной, регламентированной технологией укладки и условиями формирования слоя.

4. Полагая в общей расчетной схеме толщины отсутствующих слоев равными нулю, можно получать практически все обычно встречающиеся при проектировании варианты конструкций дорожных одежд. Например, дорожная одежда из двухслойного асфальтобетона, уложенного на слой обработанного битумом щебня, лежащего, в свою очередь, на двухслойном основании из укрепленного цементом материала и грунта земляного полотна, будет обозначаться так: 1, 2, 3, 5, 6, 10.

5. В качестве исходной информации вводятся следующие данные:

тип расчетной нагрузки и ее параметры: среднее давление колеса на покрытие P (МПа) и диаметр следа колеса D (м);

расчетная перспективная интенсивность воздействия нагрузки на полосу движения N_p (ед./сут);

тип одежды и покрытия, категория дороги, дорожно-климатическая зона, тип местности по условиям увлажнения;

дорожно-климатическая зона и тип местности по условиям увлажнения;

допустимый уровень надежности K_H проектируемой конструкции к концу периода между капитальными ремонтами и минимальное значение коэффициента прочности $K_{пр}$, которое дорожная одежда в зависимости от категории дороги и типа покрытия может иметь к концу срока службы между капитальными ремонтами;

требуемый общий модуль упругости дорожной одежды $E_{тр}$ (МПа);

вид материалов конструктивных слоев (индекс слоя i) и исходные толщины h_i (заведомо больше требуемых). Для слоев 1 и 2 – тип асфальтобетона и марка битума. Для слоя 7 – содержание в материале частиц размером мельче 0,63 мм m (%) (или показатель дробимости мало-прочного щебня, %) и число пластичности n ;

деформационные и прочностные характеристики для слоев 1 и 2:

а) расчетные модули упругости E'_1, E''_1, E'''_1 (где E'_1 – модуль упругости при расчете прочности слоя 2 на изгиб (при определении показателя прочности слоя Δ_2); E''_1 – модуль упругости при расчете по упругому прогибу (при определении общего показателя прочности Δ_0); E'''_1 – модуль упругость при расчете промежуточных слоев 5 и 6 на растяжение при изгибе и при расчете слоев одежды по сдвигу (при определении $\Delta_5 - \Delta_{10}$);

б) расчетное значение сопротивления материала слоя 2 растяжению при изгибе;

деформационные и прочностные характеристики материалов промежуточных слоев:

в) расчетные модули упругости E_i слоев 3 и 4;

б) модули упругости E_i и сопротивление растяжению при изгибе R_i слоев 5 и 6;

в) расчетный модуль упругости E_i , угол внутреннего трения U_i и сцепление C_i для слоя 7;

г) расчетные модули упругости E_i , углы внутреннего трения U_i и сцепления C_i для слоев 8 и 9;

вид грунта и его расчетные характеристики:

а) если грунт – песок (кроме пылеватого) или супесь легкая крупная, – расчетный модуль упругости C_{10} , угол внутреннего трения U_{10} и сцепление C_{10} ;

б) если грунты глинистые, – исходная относительная средняя многолетняя влажность $\left(\frac{\bar{W}}{W_T}\right)_{\text{исх}}$, назначаемая в зависимости от дорожно-климатической зоны и типа местности по условиям увлажнения (где W_T – влажность на границе текучести; \bar{W} – средняя влажность).

К исходной относительной средней влажности грунта вводится поправка

$\left(\frac{\bar{W}}{W_T}\right)_{\text{попр}}$, учитывающая особые условия работы дорожной конструкции.

минимальные конструктивные толщины слоев дорожной одежды $h_{i\min}$;

максимальная толщина второго слоя $h_{2\max}$;

суммарная толщина стабильных слоев дорожной одежды $h_{i\min\text{мор}}$, рассчитанная из условия обеспечения морозоустойчивости конструкции;

затраты S_i на устройство 1 м^2 конструктивного слоя толщиной 1 см , руб.·см/м²;

номера конструктивных слоев d, f, j , толщины которых попарно варьируют (покрытие–основание, покрытие – дополнительные слои основания, основание – дополнительные слои основания) при выборе оптимального по затратам варианта конструкции (где d – индекс варьируемого слоя покрытия, f – основания, j – морозозащитного слоя).

6. Рассчитывается требуемый общий модуль упругости дорожной одежды $E_{\text{тр}}$ (МПа).

7. Расчетное сопротивление материала слоя 2 растяжению при изгибе R_2 (МПа) определяется в зависимости от уровня проектной надежности K_H

8. Определяется расчетное сопротивление растяжению при изгибе $R_{\text{рас}(i)}$

9. Определяется расчетный модуль упругости E_i , угол внутреннего трения Y_i и сцепление C_i для слоя 7.

Последовательность операций при расчете дорожной одежды представляется в виде блок-схемы алгоритма для отыскания оптимальных толщин слоев дорожной одежды (рисунок 2) и состоит из пяти блоков: I – введение исходной информации; II – оценка прочности конструкции; III – корректировка толщин слоев одежды с целью обеспечения условий прочности; IV – нахождение оптимального по строительным затратам варианта дорожной одежды методом покоординатного спуска; V – определение толщины слоев одежды, удовлетворяющей требованиям морозозащиты земляного полотна.

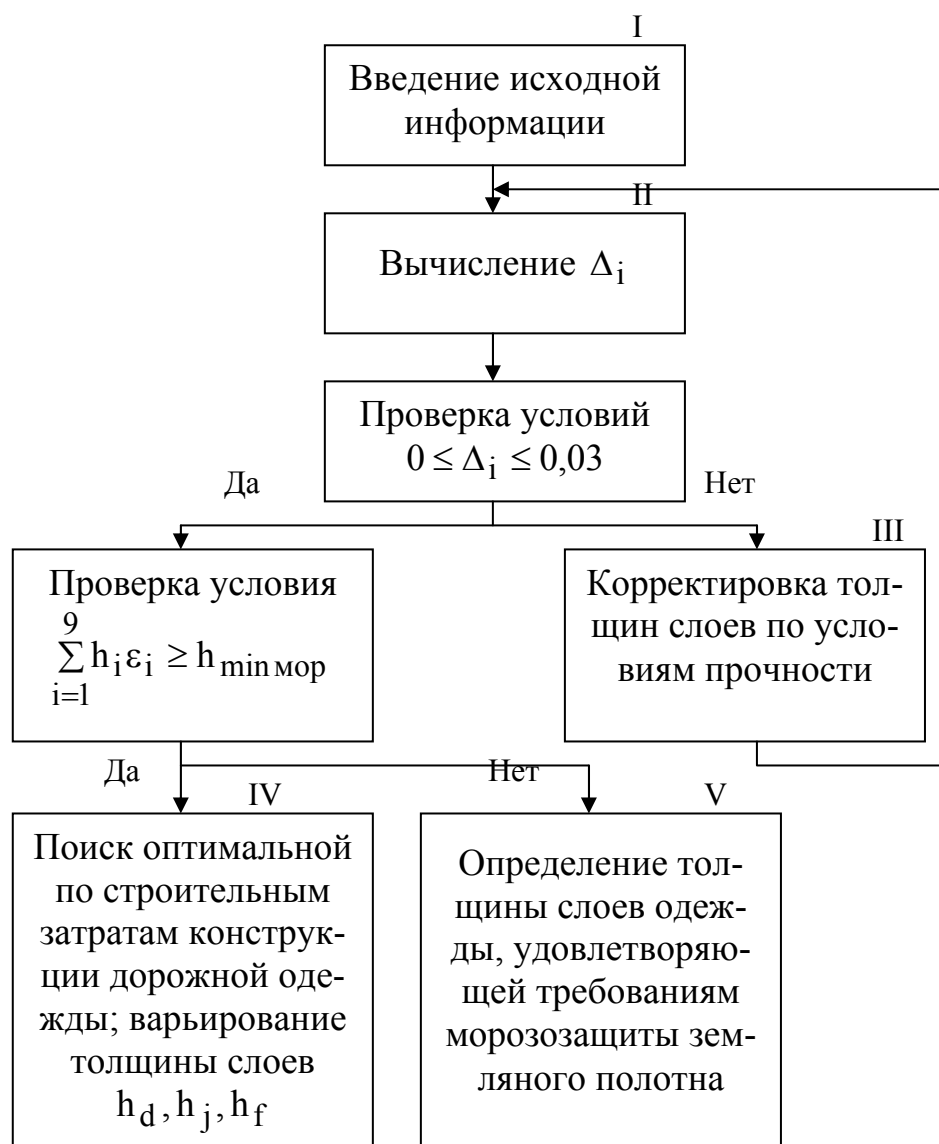


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма для расчета толщин слоев дорожной одежды [1]

Блок II

1. В процессе расчетов все предусмотренные блоком II операции повторяются многократно. Для программы этот блок является стандартным и на схемах обозначается треугольником с цифрой II внутри. Блок II включает следующие операции.

2. Вводимые в блок толщины слоев сопоставляются с минимальными конструктивными. Если $h_i \leq h_{i \min}$, то принимается $h_i = h_{i \min}$.

3. Для глинистых грунтов и пылеватых песков по заданной исходной относительной средней многолетней влажности с учетом заданного уровня на-

дежности и поправки на условия работы вычисляют исходную относительную влажность. Полученную исходную влажность принимают за расчетную, если выполняются условие:

$$\sum_{i=1}^9 h_i \leq 0,75 \text{ и } \left(\frac{W}{W_T} \right)_{\text{исх}} \leq 0,75. \quad (1)$$

В противном случае расчетную влажность грунта $\left(\frac{W}{W_T} \right)_p$ вычисляют по

формуле

$$\left(\frac{W}{W_T} \right)_p = 10^{-4} \cdot a \left(\sum_{i=1}^9 h_i \right)^2 - 10^{-2} \cdot b \left(\sum_{i=1}^9 h_i \right) + c, \quad (2)$$

где $a = -0,967 \left(\frac{W}{W_T} \right)_{\text{исх}}^2 + 1,956 \left(\frac{W}{W_T} \right)_{\text{исх}} - 0,924;$

$$b = -2,531 \left(\frac{W}{W_T} \right)_{\text{исх}}^2 + 5,745 \left(\frac{W}{W_T} \right)_{\text{исх}} - 2,885;$$

$$c = -2,029 \left(\frac{W}{W_T} \right)_{\text{исх}}^2 + 5,319 \left(\frac{W}{W_T} \right)_{\text{исх}} - 2,098.$$

4. Для каждого рассчитываемого слоя, включая слой 10, вычисляют показатель прочности Δ_i . Под показателем прочности понимают отклонение коэффициента прочности данной конструкции (фактического) – по какому-либо критерию от минимально допустимого при заданном уровне надежности. В общем виде показатель прочности выражается формулой

$$\Delta_i = \frac{[\sigma] - \sigma_i K_{\text{нр}}^0}{\sigma_i K_{\text{нр}}^0}, \quad (3)$$

где $[\sigma]$ – допустимое напряжение для ($R_{\text{доп}(i)}$ или $T_{\text{доп}(i)}$) для i -го слоя; σ_i – фактическое напряжение сдвига или растягивающее напряжение при изгибе в i -м слое; $K_{\text{нр}}^0$ – минимальное допустимое значение коэффициента прочности, назначаемое в зависимости от уровня заданной надежности.

Знак «минус» у Δ_i означает, что прочность слоя недостаточна, «плюс» – что условия прочности в слое удовлетворительны. Если $h_i = 0$, то принимается $\Delta_i = 0$. Условия прочности конструкции в целом оценивают величиной общего показателя прочности Δ_0 .

$$\Delta_0 = \frac{E_{\text{общ}}^{(1)} - E_{\text{тр}} K_{\text{пр}}^0}{E_{\text{тр}} K_{\text{пр}}^0}. \quad (4)$$

Ниже приведена последовательность операций по вычислению показателей прочности.

5. Определение Δ_0 . Полагая модуль упругости грунта равным $E_{\text{общ}}^{(10)}$, последовательно рассчитывают двухслойные системы, состоящие из очередного конструктивного слоя одежды и нижележащего полупространства. При этом: определяют отношение модуля упругости подстилающего полупространства $E_{\text{общ}}^{(i+1)}$ к модулю слоя E_i при $i=9, 8, 7, 4, 1$; вычисляют отношение толщины слоя h_i к расчетному диаметру D ; для вычисленных отношений $\frac{h_i}{D}$ и $\frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i}$ находят отношение общего модуля на поверхности рассматриваемого слоя $E_{\text{общ}}^{(i)}$ к модулю слоя E_i .

Отношение $\frac{E_{\text{общ}}^{(i)}}{E_i}$ может быть вычислено и по формулам:

а) при $0 \leq \frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i} \leq 0,5$

$$\frac{E_{\text{общ}}^{(i)}}{E_i} = \frac{\left[1,05 - 0,125 \frac{h_i}{D} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i}} \right) \right]}{0,713 \sqrt[3]{\frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i}} \arctg \left(1,35 \frac{h_3}{D} \right) + \frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i} \left(1 - \frac{\pi}{2} \arctg \frac{h_3}{D} \right)} M; \quad (5)$$

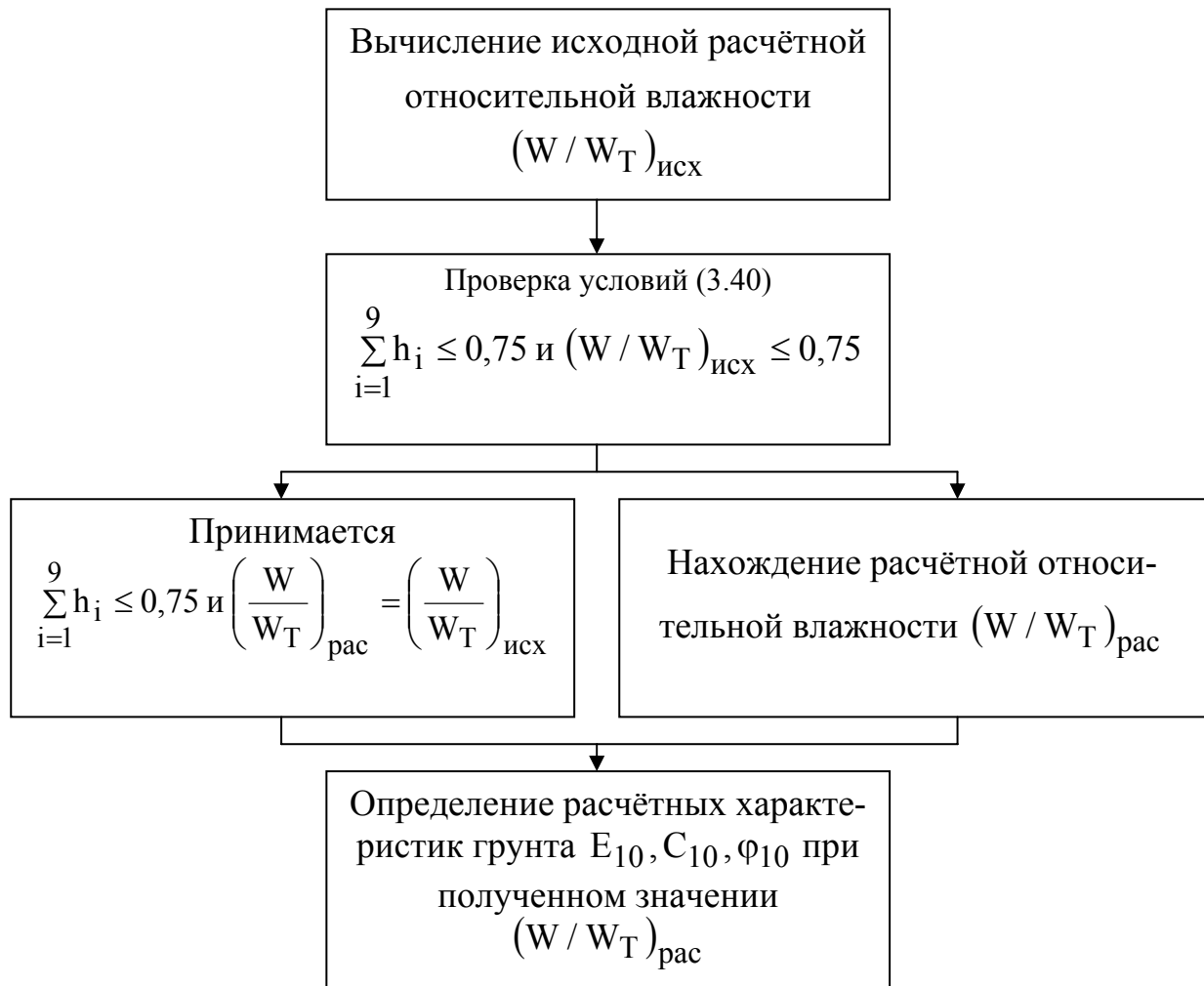


Рисунок 3 – Схема определения нормативных характеристик глинистых грунтов и пылеватых песков

$$\text{б) при } \frac{E_{\text{общ}}^{(i)}}{E_i} = \frac{\frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i} M}{1 - \frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i} (1 - M_i)}; \tag{6}$$

где $\frac{h_3}{D} = \frac{2h_i}{D} \sqrt[3]{\frac{E_i}{6E_{\text{общ}}^{(i+1)}}};$

$$M = 1 - 1,1 \exp\left(-2,5 \frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i}\right) \times \left\{ \frac{0,045}{0,4 + \frac{h_i}{D}} \sin\left[3,58 \frac{h_i}{D} \exp\left(-0,65 \frac{h_i}{D}\right) \pi\right] + 0,20 \exp\left(-10 \frac{h_i}{D}\right) \right\};$$

$$M_1 = \sqrt{1 + \left(2 \frac{h_i}{D}\right)^2} \sqrt[3]{\left(\frac{E_i}{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}\right)^2};$$

вычисляют общий модуль на поверхности двухслойной системы

$$E_{\text{общ}}^{(i)} = \frac{E_{\text{общ}}^{(i)}}{E_i} E_i$$

и заносят его в память;

производя такой расчет столько раз, сколько конструктивных слоев в одежде, доходят до верхнего слоя и определяют $E_{\text{общ}}^{(1)}$. Если какие-либо из девяти слоев отсутствуют, то принимают

$$E_{\text{общ}}^{(i+1)} = E_{\text{общ}}^{(i)};$$

вычисляют общий показатель прочности Δ_0 .

6. Определение Δ_2 . Слой 2 рассчитывают на растяжение при изгибе. Порядок расчета следующий определяют средний модуль упругости слоев 1 и 2:

$$E_{\text{ср}}^{***} = \frac{\sum_{i=1}^2 E'_i h_i}{\sum_{i=1}^2 h_i}.$$

В случае отсутствия слоя 1 $E_{\text{ср}}^{***} = E'_2$;

находят отношение $\frac{E_{\text{ср}}^{**}}{E_{\text{общ}}^{(3)}}$. Общий модуль упругости под слоем 2 $E_{\text{общ}}^{(3)}$

принимают согласно приведенному выше расчету для определения Δ_0 ;

вычисляют отношение $\frac{\sum_{i=1}^2 h_i}{D}$. В зависимости от $\frac{\sum_{i=1}^2 h_i}{D}$ и $\frac{E_{\text{ср}}^{***}}{E_{\text{общ}}^{(3)}}$ находят

растягивающее напряжение $\bar{\sigma}_{\text{ч}}(2)$ в рассчитываемом слое от единичной нагрузки.

Напряжение $\bar{\sigma}_ч$ может быть также определено по формулам:

$$\text{а) при } \frac{\sum_{i=1}^2 h_i}{D} > \frac{1,42}{\frac{E_{ср}^{***}}{E_{общ}^{(3)}}} + 0,27$$

$$\bar{\sigma}_ч = 1,28 \frac{E_{ср}^{***}}{E_{общ}^{(3)}} \frac{\sum_{i=1}^2 h_i}{D} \left(1 - 0,637 \arctg \frac{1}{C} \right)^2; \quad (7)$$

$$\text{б) при } \frac{\sum_{i=1}^2 h_i}{D} \leq \frac{1,42}{\frac{E_{ср}^{***}}{E_{общ}^{(3)}}} + 0,27$$

$$\bar{\sigma}_ч = \left(1,818 + 0,162 \frac{E_{ср}^{***}}{E_{общ}^{(3)}} \right) (1 - 0,637 \arctg C_1) \left(\arctg \frac{1}{C_1} \right)^2, \quad (8)$$

$$\text{где } C = a \left(\frac{\sum_{i=1}^2 h_i}{D} \right)^2 + b, \quad a = 0,083 \left(\ln \frac{E_{ср}^{***}}{E_{общ}^{(3)}} \right)^{1,4} + 0,007;$$

$$C_1 = a \left[\frac{1,42}{\frac{E_{ср}^{***}}{E_{общ}^{(3)}}} + 0,127 + b \right], \text{ вычисляют полное растягивающее напряжение}$$

$$\sigma_{ч(2)} = \rho \bar{\sigma}_ч \cdot 0,85, \quad (9)$$

рассчитывают показатель прочности

$$\Delta_2 = \left(R_{\text{доп}(2)} - \sigma_{ч(2)} K_{\text{пр}}^0 \right) / \sigma_{ч(2)} K_{\text{пр}}^0, \quad (10)$$

где $R_{\text{доп}(2)}$ – допустимое значение растягивающего напряжения слоя 2.

7. Определение Δ_5 и Δ_6 . Слой 6 рассчитывают на растяжение при изгибе. Расчет слоя 5 аналогичен расчету слоя 6, поэтому в излагаемом порядке расчета номера слоев 5 и 6 заменяются индексом n ; вычисляют средний модуль упругости слоев, лежащих над рассчитываемым:

$$E_{\text{ср}}^{**} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} E_i' h_i'}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}, \quad (11)$$

находят отношение этой величины к модулю упругости рассчитываемого слоя $\frac{E_{\text{ср}}^{**}}{E_n}$; определяют отношение суммы толщин вышележащих слоев и толщины

рассчитываемого слоя $\sum_{i=1}^n h_i / D$; по известным отношениям $\frac{E_{\text{ср}}^{**}}{E_n}$ и $\sum_{i=1}^n h_i / D$ на-

ходят величину y по формуле

$$y = a \exp\left(b \frac{E_{\text{ср}}^{**}}{E_n}\right) + C, \quad (12)$$

где $a = 6,37701 \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i}{D}\right)^{-0,87057} - 1,88424$; $b = -0,124$;

$c = 4,54964 \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i}{D}\right)^{-1,4951} - 0,73075$; вычисляют отношение модуля упру-

гости рассчитываемого слоя E_n к общему модулю упругости нижележащих слоев конструкции $E_{\text{общ}}^{(n+1)}$.

Значение $E_{\text{общ}}^{(n+1)}$ было найдено при определении Δ_0 ; рассчитывают растягивающее напряжение при изгибе

$$\sigma_{\text{чп}} = \rho \frac{\left(\frac{E_n}{E_{\text{общ}}^{(n+1)}} \right)^2}{9,83 \left(\frac{E_n}{E_{\text{общ}}^{(n+1)}} \right)^2 + 79,6 \frac{E_n}{E_{\text{общ}}^{(n+1)}} - 5,80}, \quad (13)$$

вычисляют показатель прочности

$$\Delta_n = \left(R_{\text{доп}(n)} - \sigma_{\text{ч}(n)} K_{\text{пр}}^0 \right) / \sigma_{\text{ч}(n)} K_{\text{пр}}^0, \quad (14)$$

где $R_{\text{доп}(n)}$ – заданное допустимое напряжение растяжения при изгибе.

8. Определение $\Delta_7, \Delta_8, \Delta_9, \Delta_{10}$. Слои 7, 8, 9 и грунтовое полупространство рассчитывают исходя из условия, чтобы в материале слоя или в грунте не возникал сдвиг. Расчет всех слоев ведется по одной схеме, поэтому излагается порядок расчета для слоя с индексом l :

находят суммарную толщину $\sum_{i=1}^{l-1} h_i$ и средний модуль упругости слоев

$E_{\text{ср}}^*$, лежащих над рассчитываемым: $E_{\text{ср}}^{**} = \frac{\sum_{i=1}^{l-1} E_i' h_i}{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}$; вычисляют отношение

среднего модуля упругости $E_{\text{ср}}^*$ слоев, лежащих над рассчитываемым, к модулю упругости E_l рассчитываемого слоя; определяют отношение суммарной

толщины слоев, лежащих над рассчитываемым, $\sum_{i=1}^{l-1} h_i / D$; находят активное на-

пряжение сдвига от временной нагрузки $\tau_{n(l)}$ или по формулам:

$$\text{а) при } 0,1 \leq \frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} < 1, z = \frac{1}{a + b \frac{E_{\text{ср}}^*}{E_{\text{общ}}^{(l)}}}$$

$$\text{б) при } 1 \leq \frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} < 3, z = a' \left(\frac{E_{\text{ср}}^*}{E_{\text{общ}}^{(l)}} \right)^{b'}, \quad (15)$$

$$\text{в) при } 3 \leq \frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} < 4, z = a' \left(\frac{E_{\text{ср}}^*}{E_{\text{общ}}^{(l)}} \right)^{b'} \left(0,325 \frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} + 0,025 \right), \quad (16)$$

где

$$a = 0,01041 + 0,05461 \frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} - 0,2029 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^2 + 0,25405 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^3 - 0,092 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^4;$$

$$b = 10^{-4} \left[4,71 - 47,39 \frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} + 230,25 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^2 - 35,4 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^3 + 2,87 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^4 \right];$$

$$a' = 275,48 + 334,12 \frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} + 162,32 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^2 - 35,4 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^3 + 2,87 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^4;$$

$$b' = -0,461 - 0,568 \frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} + 0,507 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^2 - 0,17 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^3 + 0,019 \left(\frac{\sum_{i=1}^{l-1} h_i}{D} \right)^4.$$

Затем вычисляют $\tau_{H(l)}$ (МПа) по выражению

$$\tau_{H(l)} = 0,00459 Z_p \cdot 10^{-0,0132 y_i}, \quad (17)$$

где Z_p – равномерно распределенная нагрузка на поверхности покрытия, МПа; y_i – угол внутреннего трения, град;

находят активное напряжение сдвига от веса вышележащих слоев толщиной

$$\sum_{i=1}^{l-1} h_i : \tau_B = 10^{-5} (5 - 0,3y_i) \sum_{i=1}^{l-1} h_i .$$

определяют полное активное напряжение сдвига в рассчитываемом слое:

$$T_l = \tau_H(l) + \tau_B ;$$

находят допустимое напряжение сдвига $T_{\text{доп}(l)}$ при расчете слоев 7, 8 и 9:

$$T_{\text{доп}(l)} = C_1 K_1 K_2 K_3 = C_1 \cdot 0,6 (0,345 \lg N_p + 1,816) K_3 . \quad (18)$$

вычисляют показатель прочности

$$\Delta_l = \frac{T_{\text{доп}(l)} - T_l K_{\text{пр}}^0}{T_l K_{\text{пр}}^0} . \quad (19)$$

9. Определяют, из какого блока (из исходного, II или IV) конструкция поступила в блок II. В блоке II после вычисления всех показателей прочности проверяется индекс итерации ($K = 0$ или $K^1 = 0$).

Если $K = 0$, конструкция с вычисленными показателями прочности вновь поступает в блок IV для последующих операций без каких-либо дополнительных проверок. Если $K^1 = 0$, то организуется проверка условий прочности по следующей схеме.

10. Проверяют, удовлетворяются ли условия прочности во всех слоях и в конструкции в целом. Принимают, что конструкция прочная, если $\Delta_i \geq 0$.

При несоблюдении этого условия хотя бы по одному показателю прочности конструкция вновь поступает в блок III на корректировку толщин слоев 1 – 9.

Если все показатели прочности больше нуля (конструкция прочная), то устанавливают, нет ли в конструкции явно излишних запасов прочности. Для этого проверяют условие, вписывается ли хотя бы один какой-либо показатель прочности в пределы:

$$0 \leq \Delta_i \leq 0,03 . \quad (20)$$

Если условие (20) хотя бы для одного показателя прочности удовлетворяется, то конструкция поступает в блок IV; если нет – в блок III.

Каждый раз при прохождении конструкции через блок III ей присваивается индекс K , отмечающий номер итерации.

Блок III предназначен для корректировки толщин слоев одежды в целях обеспечения прочности конструкции или ликвидации излишних запасов прочности.

Коррективы в толщины слоев вносятся по формулам, полученным на основе обобщения многочисленных расчетов дорожных одежд в различных условиях. Корректировка толщин слоев производится в зависимости от показателей прочности.

В блоке III производятся следующие операции.

1. Толщины слоев на каждой последующей итерации ($K+1$) рассчитывают по приводимым ниже формулам:

$$\text{слой 2: } h_{2,(k+1)} = h_{2,k} - 5\Delta_{2,k} - 10\Delta_{\alpha,k}, \quad (21)$$

где $\Delta_{\alpha,k}$ – наименьшее значение показателя прочности из $\Delta_{0,k}, \Delta_{1,k}, \Delta_{10,k}$.

При отсутствии слоев 4 и 6 показатель $\Delta_{\alpha,k}$ в формуле (7.38) выбирается из $\Delta_{0,k}, \Delta_{1,k}, \Delta_{10,k}, \Delta_{7,k}$. Если к тому же окажется, что $\Delta_{7,k} < 0$ и $h_{2,k} = h_{2\max}$, то необходимо вывести на печать отметку, что исходные условия не позволяют выбрать конструкцию. Затем принимают $h_{2\max} = h_{2\max} + 1$ и полагают для дальнейших расчетов $h_{2,(k+1)} = h_{2\max}$:

$$\text{слой 4: } h_{4,(k+1)} = h_{4,k} - 10\Delta_{\alpha,k},$$

где $\Delta_{\alpha,k}$ – наименьшее значение показателя прочности из $\Delta_{0,k}, \Delta_{2,k}, \Delta_{7,k}, \Delta_{8,k}, \Delta_{9,k}, \Delta_{10,k}$. Здесь и далее в сопоставлении участвуют показатели прочности только тех слоев, толщины которых не равны нулю;

$$\text{слой 5: } h_{5,(k+1)} = h_{5,k} - 5\Delta_{6,k} - 3\Delta_{7,k} - 3\Delta_{8,k} - 3\Delta_{9,k} - 10\Delta_{\alpha,k},$$

где $\Delta_{\alpha,k}$ – наименьшее значение показателя прочности из $\Delta_{0,k}, \Delta_{2,k}, \Delta_{6,k}, \Delta_{7,k}, \Delta_{8,k}, \Delta_{9,k}, \Delta_{10,k}$;

$$\text{слой 6: } h_{6,(k+1)} = h_{6,k} - 5\Delta_{6,k} - 3\Delta_{7,k} - 3\Delta_{8,k} - 3\Delta_{9,k} - 10\Delta_{\alpha,k},$$

где $\Delta_{\alpha,k}$ – наименьшее значение показателя прочности из $\Delta_{0,k}, \Delta_{2,k}, \Delta_{6,k}, \Delta_{7,k}, \Delta_{8,k}, \Delta_{9,k}, \Delta_{10,k}$;

$$\text{слой 7: } h_{7,(k+1)} = h_{7,k} - 15\Delta_{\alpha,k},$$

где $\Delta_{\alpha,k}$ – наименьшее значение показателя прочности из $\Delta_{0,k}, \Delta_{2,k}, \Delta_{6,k}, \Delta_{8,k}, \Delta_{9,k}, \Delta_{10,k}$;

$$\text{слой 8: } h_{8,(k+1)} = h_{8,k} - 3[h_{2,(k+1)} - h_{2,k}] - 1,5[h_{4,(k+1)} - h_{4,k}] - 2[h_{5,(k+1)} - h_{5,k}] - 2[h_{5,(k+1)} - h_{5,k}] - 40\Delta_{\alpha,k},$$

где $\Delta_{\alpha,k}$ – наименьшее значение показателя прочности из $\Delta_{0,k}, \Delta_{2,k}, \Delta_{6,k}, \Delta_{10,k}$.

$$\text{слой 9: } h_{8,(k+1)} = h_{8,k} - 3[h_{2,(k+1)} - h_{2,k}] - 1,5[h_{4,(k+1)} - h_{4,k}] - 2[h_{5,(k+1)} - h_{5,k}] - 2[h_{6,(k+1)} - h_{6,k}] - 40\Delta_{\alpha,k},$$

где $\Delta_{\alpha,k}$ – наименьшее значение показателя прочности из $\Delta_{0,k}, \Delta_{2,k}, \Delta_{6,k}, \Delta_{10,k}$.

2. Проверяют, удовлетворяют ли абсолютные значения поправок для слоев $i = 2; 4; 5; 6; 7$ условию

$$|h_{i(k+1)} - h_{i,k}| \geq 1. \quad (22)$$

Если неравенство (22) не удовлетворяется, то полагают

$$h_{i(k+1)} = h_{i,k} \pm 1.$$

Знак «+» или «-» принимается обратным знаком показателя прочности $\Delta_{\alpha,k}$.

3. Проверяют, выполняется ли условие

$$h_i \geq h_{i \min}, \quad i = 2; 4; 5; 6; 7; 8; 9. \quad (23)$$

Если неравенство (23) для какого-либо слоя не удовлетворяется, то для этого слоя принимают $h_i = h_{i \min}$.

4. Проверяют, удовлетворяется ли неравенство

$$h_i \leq h_{i \max}, \quad i = 2; 4; 5; 6; 7; 8; 9. \quad (24)$$

Если для какого-либо слоя условие (24) оказывается нарушенным, то для этого слоя принимают $h_i = h_{i \max}$.

5. Вычисляют индекс итерации в блоке III: $K = K + 1$.

6. Расчет любой конструкции дорожной одежды с подбором толщины по блоку III и с удовлетворением условий прочности по второй части блока II всегда будет завершен максимально за 25 итераций. Если расчет не завершится, то это означает, что неудовлетворительно заданы исходные условия. Такая конструкция должна быть выведена в блок IV с соответствующей отметкой. Поэтому завершающим этапом расчетов в блоке III должна быть проверка условия $K^3 \leq 25$.

Если оно выполняется, то конструкция поступает в блок IV; если нет – то, в зависимости от условий прочности, она либо возвращается в блок II, либо поступает в блок IV. Проверка конструкции дорожной одежды по условию морозоустойчивости.

7. Конструкция дорожной одежды (толщины слоев), рассчитанная по условию прочности в блоке II, проверяется на морозоустойчивость. Для этого толщина одежды, необходимая по условиям прочности всей конструкции и приведенная по теплопроводности к толщине слоя гранитного щебня $\left(\sum_{i=1}^9 h_i \varepsilon_i \right)$, сопоставляется с требуемой толщиной одежды $h_{\min \text{мор}}$ по условию морозоустойчивости дорожной конструкции (здесь ε_i – эквивалент теплотехнических свойств материала (по отношению к гранитному щебню)).

Если $\sum_{i=1}^9 h_i \varepsilon_i \geq h_{\min \text{мор}}$, то толщины слоев одежды, рассчитанной по усло-

виям прочности, поступают в блок IV. Если $\sum_{i=1}^9 h_i \varepsilon_i < h_{\min \text{мор}}$, то проводится их корректировка в блоке V.

8. Блок IV предназначен для нахождения оптимального по строительным затратам варианта дорожной одежды методом покоординатного спуска.

9. Предусматривается проводить расчеты в три этапа (индекс этапа). На каждом этапе варьируют попарно толщины двух из заданных слоев с индексом d, f, j , оставляя толщину третьего неизменной. На схеме варьируемые толщины выше– и нижележащего слоев обозначены индексами соответственно U и V . На первом этапе варьируют толщины покрытия h_d и верхнего слоя основания h_f , на втором – толщины покрытия h_d и нижнего слоя основания h_j , на третьем – толщину верхнего слоя основания h_f с подбором толщины нижнего подстилающего слоя h_j .

10. Для каждой итерации строительные затраты S_k к определяются по формуле

$$S_k = \sum_{i=1}^9 S_i h_i \cdot \quad (25)$$

Значение S_i задано в исходной информации.

11. Для расчетов на каждом последующем этапе принимается вариант с наименьшим значением $S_{k \min}$ из всех, встречавшихся на данном и предыдущих этапах. Если две или несколько конструкций имеют минимальные затраты, то для дальнейших расчетов автоматически выбирается вариант с наименьшим значением h_d . Если встречаются варианты с одинаковыми минимальными затратами и равными значениями h_d , то за основу принимают конструкцию с меньшей толщиной верхнего слоя основания h_f .

12. Проведение расчетов по первым трем этапам ($n=3$) составляет первое приближение ($q=1$) к конструкции, имеющей минимальные строительные затраты. Для нахождения такой конструкции осуществляются второе и последующие приближения, для чего толщины конструкции с минимальными затратами, полученными на предыдущем приближении, снова поступают в начало блока IV.

Если толщины слоев, определенные на предыдущем и последующем приближениях, отличаются менее чем на 1 см, расчет считается окончанным. При

этом на выход должны быть поданы из памяти данные не только по варианту конструкции с наименьшим значением $S_{k\min}$, но и по всем остальным удовлетворяющим условиям прочности вариантам, встречавшимся при поиске оптимального соотношения толщин слоев.

На основании этих данных из конструкций, незначительно отличающихся между собой по строительным затратам, может быть выбрана наиболее целесообразная в данных условиях по натуральным показателям (энергоёмкости, необходимости расхода дефицитных материалов, индустриальности и т.д.).

13. В блоке V определяются толщины слоев дорожной одежды для случая, когда их общая толщина должна удовлетворять требованиям морозозащиты земляного полотна. При этом экономические требования к соотношению толщин слоев становятся второстепенными, так как конструкция проектируется по принципу подбора минимально допустимых толщин покрытия и верхнего слоя основания при значительном развитии толщины наиболее дешевого морозозащитного слоя. Этот принцип и реализуется в блоке V.

14. Алгоритм предусматривает введение коррективов в толщины покрытия h_d верхнего слоя основания h_f и нижнего слоя основания (морозозащитного) h_j , если

$$\sum_{i=1}^9 h_j \varepsilon_i < h_{\min \text{ мор}}, \quad (26)$$

где $h_{\min \text{ мор}}$ – минимальная толщина слоя одежды, требуемая по условиям морозозащиты; определяется по составленным заранее таблицам.

Список литературы

1. Сильянов, В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог / В.В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1984. – 287 с.