ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ НАСЫПЕЙ НА БОЛОТАХ ПО УСЛОВИЮ ДОПУСТИМЫХ УПРУГИХ ОСАДОК

Одобрены Главтранспроектом

Москва 1981

gost.e-ecolog.ru

ПРЕДИСЛОВИЕ

Увеличение скорости движения и весовых норм поездов, внедрение большегрузных вагонов и мощных локомотивов усиливает динамическое воздействие транспортной нагрузки на путь.

Под нагрузкой от поездов в земляном полотне помимо прочих процессов возникают обратимые (упругие) деформации. Особенно велика роль и значимость этих деформаций для насыпей на болотах. Повышенная податливость торфа в основании таких насыпей вызывает деформации самих насыпей.

При чрезмерном развитии упругих деформаций нарушается работа элементов верхнего строения пути и земляного полотна. Нередко на таких участках вводится постоянное ограничение скоростей движения поездов, которое наносит значительный материальный ущерб.

Настоящие Методические рекомендации содержат метод расчета основных конструктивных элементов земляного полотна на болотах (высоты насыпи и глубины выторфовывания), исходя из допустимых по условиям нормальной эксплуатации упругих осадок насыпей.

Методические рекомендации разработаны канд.техн. наук С.Г.Корняком и инж. Н.Н.Серовой при участии инж. Л.И.Кузнецовой и канд.техн.наук Е.А.Яковлевой.

Работа выполнена в лаборатории конструкции земляного полотна ЦНИИСа. В проведении полевых инженерно-геологических обследований принимали участие сотрудники институтов Гипротранспуть, Ленгипротранс и Киевгипротранс.

Замечания и предложения по работе направлять по адресу: 129329, Москва, Кольская ул., д.I, ЦНИИС.

Зам.директора института Н.Б.Соколов

Зав.отделением земляного полотна и верхнего строения пути Б.И.Цвелодуб

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящие Методические рекомендации составлены в дополнение к действующим "Методическим указаниям по проектированию земляного полотна на слабых грунтах" (М., Оргтрансстрой, 1968) и содержат метод расчета высоты насыпи и глубины вырезки торфа из ее основания, исходя из требования, чтобы упругие осадки насыпи не превышали допустимой по условиям нормальной эксплуатации величины.

Расчет по предлагаемому методу рекомендуется применять для объектов индивидуального проектирования, к числу которых относятся

насыпи на болотах I типа глубиной более 4 м;

насыпи на болотах II типа глубиной более 3 м;

насыпи на болотах линий IУ-У категорий;

насыпи на болотах под второй путь при совмещенном или раздельном земляном полотне, когда применение типовых решений может вызвать недопустимые деформации насыпи первого пути;

земляное полотно эксплуатируемых линий на болотах при его усилении посредством увеличения высоты насыпи;

другие случаи, когда применение типовых решений невозможно или нецелесообразно по технико-экономическим соображениям.

Принятая терминология

I.2. Толщина насыпи - высота ее над поверхностью болота, сложенная с глубиной выторфовывания и величиной осадки основания насыпи по оси пути.

Мощность насыпного слоя - толщина насыпи, сложенная с толщиной балластного слоя под шпалой.

Упругое перемещение поверхности торфяного основания насыпи (в дальнейшем употребляется сокращенно-упругое перемещение насыпи) - обратимое изменение положения поверхности контакта насыпь-торф по вертикали, возникающее при приложении нагрузки от движущегося поезда.

Упругая осадка поверхности торфяного основания насыпи (в дальнейшем употребляется сокращенно – упругая осадка насыпи) – упругое перемещение насыпи, при котором она занимает положение ниже исходного, имевшего место без поездной нагрузки.

Основные расчетные предпосылки

I.3. Изложенные ниже методы расчета применяются при выполнении следующих двух условий.

I. Торф под насыпью находится ниже уровня грунтовых вод.

2. Мощность насыпного слоя проектируемого земляного полотна составляет величину не менее 2 м. На неосушенных болотах условие I для насыпей, имеющих остаточную осадку более 80 см выполняется, так как средний многолетний уровень грунтовых вод на таких болотах находится на глубине от 0 до 35 см от их поверхности при средней амплитуде колебаний уровня 50 см.

Кроме того, при остаточной осадке более 60 см выполняется (с учетом требования СНиП II-39-76 о возвышении бровки "плавающей" насыпи над поверхностью болота не менее чем на I,2 м) также и условие 2.

I.4. Исследования, проведенные в ЦНИИСе, показали, что при условиях I и 2

упругие перемещения насыпи на стабилизированном основании обусловлены, главным образом, деформациями изменения формы, возникающими в торфяном грунте при приложении и снятии нагрузки от колес движущегося поезда;

величина упругой осадки торфяного основания изменяется не существенно с изменением скорости движения поезда, модуля упругости подрельсового основания, типа рельсов и эпюры шпал.

I.5. Приведенный ниже метод расчета упругих перемещений насыпи основывается на указанных положениях.

2. РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НАСЫПИ

2.1. Расчет величины упругих перемещений насыпи производится по формуле

$$\lambda = \frac{q(1+\mu)}{4\pi E(a-b)}\left\{(a+x)^2 \ln\left[1+\frac{H^2}{(a+x)^2}\right] + (a-x)^2 \ln\left[1+\frac{H^2}{(a-x)^2}\right] - (b+x)^2 \ln\left[1+\frac{H^2}{(b+x)^2}\right] - (b-x)^2 \ln\left[1+\frac{H^2}{(b-x)^2}\right] + H^2 \ln\frac{[(a+x)^2+H^2][(a-x)^2+H^2]}{[(b+x)^2+H^2][(b-x)^2+H^2]}\right\}, \quad (I)$$

где $a = h_0 + \frac{l_{шп}}{2}$;

q – интенсивность полосовой нагрузки, заменяющей воздействие поезда на основание насыпи;

μ – коэффициент Пуассона торфа под насыпью;

E – модуль упругости торфа под насыпью;

b – полуширина рельсовой колеи;

h_0 – мощность насыпного слоя (расстояние от подошвы шпалы до поверхности контакта насыпь-торф, измеренное по оси пути);

$l_{шп}$ – длина шпалы;

H – мощность слоя торфа под насыпью по оси пути;

x – расстояние от оси пути по горизонтали до точки, в которой определяется перемещение насыпи.

2.2. Зависимость (I) связывает величину упругих перемещений насыпи λ в данной точке ее поперечного сечения с расстоянием от этой точки до оси пути x, величиной нагрузки от поезда на основание q, мощностью насыпного слоя h_0, мощностью торфа под насыпью H и с упругими характеристиками торфяного грунта μ, E.

Распределение упругих перемещений, как это следует из формулы (I) и подтверждено экспериментально, неравномерно по поперечному сечению насыпи: наряду с упругой осадкой по оси пути ($x = 0$) в откосной части насыпи и за ее пределами при проходе поезда имеют место перемещения обратного знака – вверх.

Максимальная по величине упругая осадка имеет место по оси пути.

2.3. Формула для определения упругой осадки насыпи по оси пути, полученная из (I) при X = 0, имеет вид

$$\lambda = \frac{q(1+\mu)}{2\pi E(a-b)}\left[a^2 \ln\left(1+\frac{H^2}{a^2}\right) - b^2 \ln\left(1+\frac{H^2}{b^2}\right) + H^2 \ln\left(\frac{a^2+H^2}{b^2+H^2}\right)\right]. \quad (2)$$

Формула (1) преобразована к виду

$$\lambda = \frac{q}{C} \cdot K_x. \quad (3)$$

Формула (2)

$$\lambda = \frac{q}{C} \cdot K_0, \quad (4)$$

где $C = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль сдвига торфа.

$$K_x = \frac{1}{8\pi(a-b)}\left\{(a+x)^2 \ln\left[1+\frac{H^2}{(a+x)^2}\right] + (a-x)^2 \ln\left[1+\frac{H^2}{(a-x)^2}\right] - (b+x)^2 \ln\left[1+\frac{H^2}{(b+x)^2}\right] - (b-x)^2 \ln\left[1+\frac{H^2}{(b-x)^2}\right] + H^2 \ln\frac{[(a+x)^2+H^2][(a-x)^2+H^2]}{[(b+x)^2+H^2][(b-x)^2+H^2]}\right\}; \quad (5)$$

$$K_0 = \frac{1}{4\pi(a-b)}\left[a^2 \ln\left(1+\frac{H^2}{a^2}\right) - b^2 \ln\left(1+\frac{H^2}{b^2}\right) + H^2 \ln\left(\frac{a^2+H^2}{b^2+H^2}\right)\right]. \quad (6)$$

Зависимости (3) и (4) используются для практических расчетов величины упругих перемещений насыпи.

Интенсивность полосовой нагрузки q принимается равной величине максимального нормального напряжения σ_z от единицы подвижного состава данного типа на глубине $Z = h_0$.

Значения напряжений σ_z на глубинах от 2 до 8 м для основных типов единиц подвижного состава, обращающихся по железнодорожной сети СССР, приведены в таблице.

Величина функции K_0 в формуле (4) зависит от мощности насыпного слоя h_0 и мощности торфа под насыпью H. Кривые значения K_0 в зависимости от h_0 и H при $2b$ = 1520 мм и $l_{кл}$ = 2,75 м приведены на рис.I

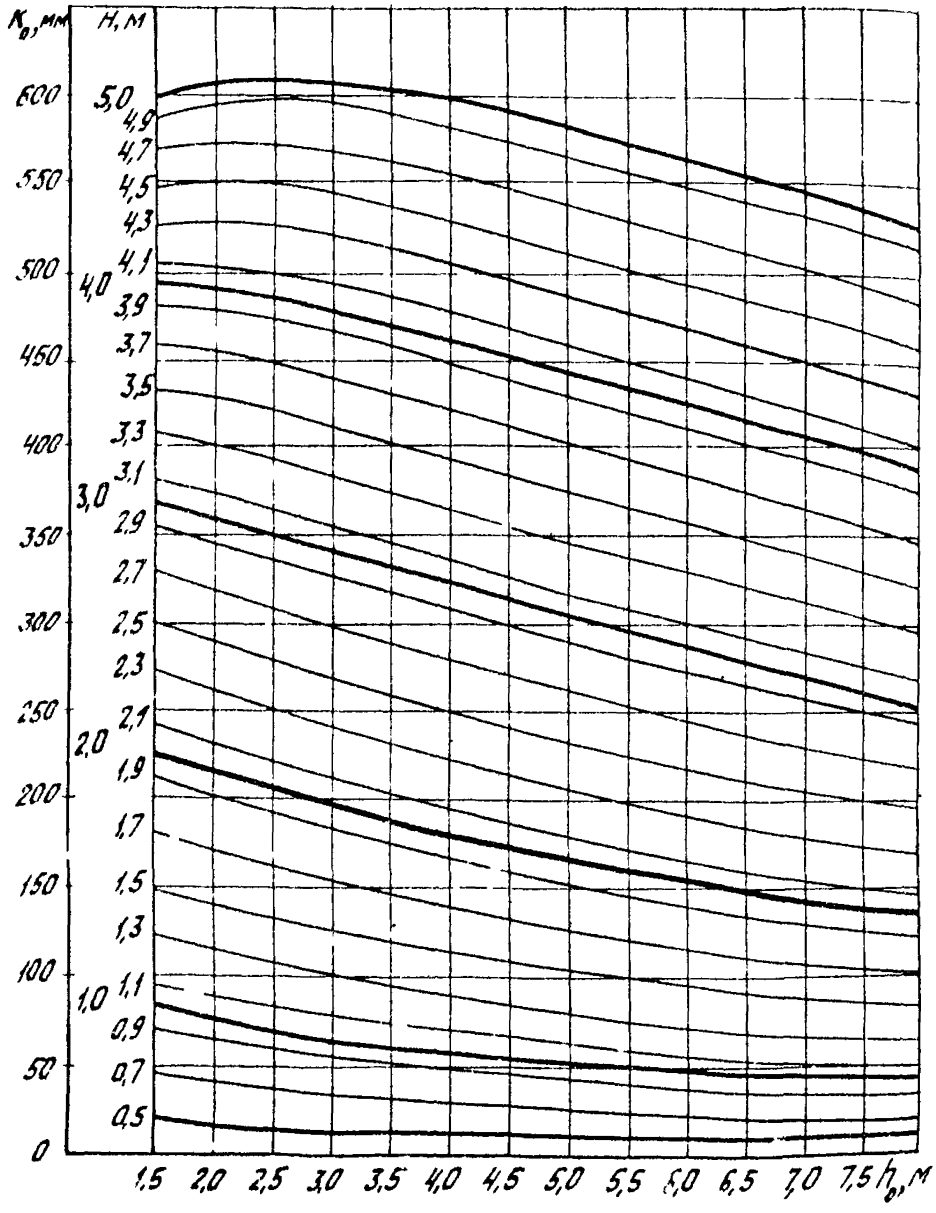


Рис.I. Кривые значений функции K_0

Расстояние от нижней постели шпалы до поверхности контакта насыпь–торф, $h_м$	Электровозы													Вагоны				Тепловозы						
	19,5т	22т	23т	23т	23т	23т	23т	23т	23т	21т	20,5т	21т	21,8	21т	21т	21т	16т	23т	21т	21,5т	21,3т	21,5т	20,5т	21т
	ВЛ19[м]	ВЛ22[м]	ВЛ23	ВЛ8	ВЛ10	ВЛ60	ВЛ80	К	Ф	ЧС7 / ЧС3	ЧС2	ЧС4	Ф[п]	4-х осные	6-и осные	8-и осные	пассажирские	ТЭ-116	ТЭ-3 ТЭ-7	ТЭ-10 ТЭП-10	1ТЭП 2ТЭП	ТЭП60	ЧМЭ3	1ТГ102к 2ТГ102
2,0	0,243	0,264	0,266	0,217	0,193	0,255	0,192	0,243	0,252	0,164	0,230	0,233	0,215	0,235	0,293	0,332	0,143	0,301	0,252	0,258	0,256	0,252	0,253	0,201
2,5	0,202	0,221	0,223	0,185	0,164	0,244	0,162	0,204	0,211	0,137	0,193	0,196	0,174	0,192	0,246	0,278	0,118	0,248	0,210	0,215	0,215	0,211	0,209	0,166
3,0	0,170	0,186	0,189	0,159	0,140	0,180	0,137	0,173	0,177	0,116	0,164	0,165	0,141	0,158	0,208	0,235	0,097	0,207	0,176	0,180	0,181	0,177	0,174	0,139
3,5	0,144	0,158	0,161	0,138	0,121	0,153	0,118	0,149	0,149	0,099	0,140	0,140	0,116	0,135	0,180	0,202	0,081	0,174	0,149	0,153	0,155	0,150	0,145	0,118
4,0	0,124	0,136	0,139	0,121	0,106	0,131	0,102	0,129	0,128	0,087	0,121	0,121	0,096	0,116	0,157	0,176	0,068	0,148	0,128	0,131	0,135	0,129	0,122	0,101
4,5	0,108	0,119	0,122	0,107	0,094	0,114	0,090	0,112	0,109	0,076	0,106	0,105	0,081	0,102	0,140	0,155	0,057	0,128	0,111	0,114	0,118	0,111	0,104	0,088
5,0	0,095	0,105	0,107	0,096	0,084	0,099	0,080	0,099	0,095	0,067	0,094	0,092	0,069	0,090	0,125	0,139	0,049	0,112	0,098	0,099	0,105	0,098	0,089	0,078
5,5	0,085	0,094	0,096	0,086	0,076	0,087	0,072	0,089	0,081	0,059	0,084	0,081	0,059	0,080	0,112	0,125	0,042	0,099	0,086	0,089	0,094	0,086	0,078	0,070
6,0	0,076	0,084	0,087	0,078	0,069	0,078	0,065	0,079	0,073	0,054	0,076	0,073	0,051	0,072	0,101	0,114	0,037	0,088	0,077	0,079	0,085	0,076	0,068	0,064
6,5	0,070	0,077	0,079	0,071	0,063	0,069	0,058	0,072	0,064	0,049	0,069	0,066	0,044	0,065	0,091	0,104	0,032	0,080	0,070	0,072	0,078	0,068	0,059	0,058
7,0	0,064	0,071	0,072	0,065	0,058	0,063	0,055	0,066	0,057	0,045	0,064	0,060	0,039	0,058	0,083	0,096	0,028	0,073	0,063	0,065	0,072	0,062	0,053	0,053
7,5	0,059	0,065	0,067	0,060	0,054	0,057	0,051	0,061	0,051	0,041	0,059	0,054	0,035	0,053	0,076	0,088	0,025	0,067	0,057	0,060	0,066	0,057	0,047	0,049
8,0	0,055	0,060	0,062	0,056	0,050	0,053	0,047	0,056	0,046	0,038	0,055	0,050	0,031	0,048	0,069	0,082	0,022	0,062	0,053	0,056	0,062	0,051	0,042	0,046

Примечания: 1. В скобках указаны нагрузки P_0 от колес на рельсы, при которых определены напряжения σ_z.

2. Для определения напряжений σ_z от вагона или локомотива данного типа, с нагрузкой $P_1 \neq P_0$ соответствующие данные таблицы следует умножить на дробь P_1/P_0

3. Напряжения для вагонов определены с учетом воздействия нагрузки от колес двух смежных тележек соседних вагонов.

Величина модуля сдвига торфа G (эмпирическое среднее) кг/см^2, определяется в зависимости от плотности скелета торфа $\gamma_{ск}$, г/см^3, по корреляционной зависимости

$$G = 1391\gamma_{ск}^3 \approx 1{,}39/(10\gamma_{ск})^3. \qquad (7)$$

Доверительный интервал, в котором при каждом фиксированном значении $\gamma_{ск}$ с вероятностью 0,9 находится теоретическое среднее значение модуля сдвига $G_т$, может быть найден по формулам:

$$G - \Delta G \leq G_т \leq G + \Delta G; \qquad (8)$$

$$\Delta G = 0{,}4\sqrt{3{,}5 + [(10\gamma_{ск})^3 - 9{,}22]^2}. \qquad (9)$$

С вероятностью 0,95 $G_т \geq G - \Delta G$.

Кривая зависимости (7) и "коридор", любое сечение которого определяет интервал, где с вероятностью 90% находится среднее значение модуля сдвига G, приведены на рис.2.

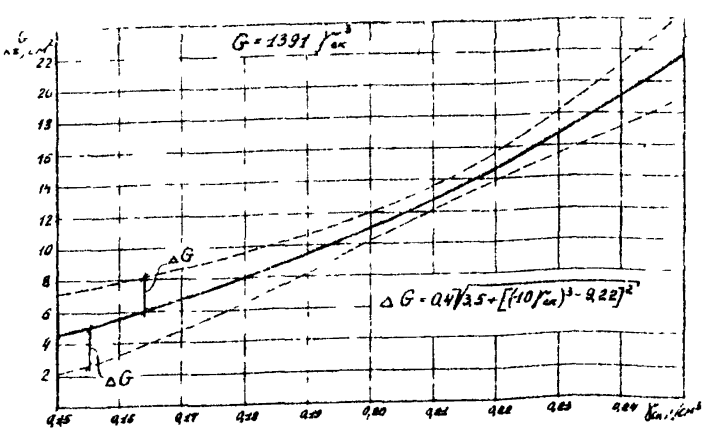


Рис.2. Зависимость модуля сдвига G от плотности торфа $\gamma_{ск}$ в основании насыпи

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ УПРУГОЙ ОСАДКИ НАСЫПИ

3.1. Определяется остаточная осадка торфяного основания для заданных условий нагружения, физико-механических свойств торфяной залежи и геометрических размеров насыпи и основания.

3.2. Определяется мощность насыпного слоя h_0 по оси пути

$$h_0 = h_{бс} + h_н + H_в + S + S_в, \qquad (10)$$

где $h_{бс}$ – толщина балластного слоя под шпалой;

$h_н$ – высота насыпи над поверхностью болота;

$H_в$ – глубина выторфовывания;

S – остаточная осадка насыпи за счет сжатия торфа в ее основании;

$S_в$ – остаточная осадка насыпи за счет выдавливания торфа.

3.3. Определяется мощность уплотненного торфа под насыпью H по формуле

$$H = H_б - H_в - S - S_в, \qquad (11)$$

где $H_б$ – мощность неуплотненного торфа (глубина болота).

3.4. Подсчитывается плотность скелета торфа под насыпью $\gamma_{ск}$:

$$\gamma_{ск} = \gamma^0_{ск} \frac{H_б - H_в}{H + S_в}, \qquad (12)$$

где $\gamma^0_{ск}$ – плотность скелета торфа в естественной залежи.

В последующих примерах расчета принято $S_в = 0$.

3.5. По таблице определяется величина напряжения σ_z от единицы подвижного состава данного типа на глубине $z = h_0$. Принимается $q = \sigma_z$.

3.6. По известным значениям h_0 и H по рис.1 или формуле (6) определяется величина K_0.

3.7. По значению $\gamma_{ск}$ по рис. 2 или формуле (7) определяется величина модуля сдвига торфа G.

3.8. По формуле (4) находится величина упругой осадки в сыпи λ .

3.9. По рис.2 или формулам (7)-(9) могут быть определены значения C_{min} и C_{max} , а по формулам $\lambda_{max} = \frac{q \cdot k_0}{C_{min}}$ и $\lambda_{min} = \frac{q \cdot k_0}{C_{max}}$ может быть определен доверительный интервал, внутри которого с вероятностью 90%, в части, зависящей от значения C , находится значение λ . Пример расчета величины упругой осадки насыпи приведен в приложении I.

Необходимый для определения упругой осадки расчет остаточной осадки насыпи производится в соответствии с рекомендациями "Методических указаний по проектированию земляного полотна на слабых грунтах". М., Оргтрансстрой, 1968.

При выполнении этого расчета можно также воспользоваться методикой, приведенной в приложении I.

4. РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОЙ ВЫСОТЫ НАСЫПИ И ГЛУБИНЫ ВЫТОРФОВЫВАНИЯ ПО УСЛОВИЮ ДОПУСТИМЫХ УПРУГИХ ОСАДОК НАСЫПЕЙ

4.1. Задача указанного расчета состоит в том, чтобы найти такую высоту насыпи $h_н$ или такую глубину выторфовывания $H_в$, при которых упругая осадка насыпи λ под нагрузкой от подвижного состава данного типа не будет превышать допустимой величины $[\lambda]$.

4.2. В качестве максимально допустимых по условиям нормальной эксплуатации пути упругих осадок насыпей на болотах $[\lambda]$ рекомендуется принимать осадки следующей величины, мм:

для железных дорог	I категории	 2
-"-	II -"-	 2,5
-"-	III -"-	 3

4.3. В качестве расчетной рекомендуется принимать ту локомотивную или вагонную нагрузку постоянного обращения, которая создает наибольшие напряжения в земляном полотне на глубине $Z = h_0 \geq 2$м (см.таблицу).

При пропуске не находящихся в постоянном обращении эпизодических нагрузок упругие осадки насыпи могут превышать величины, рекомендованные в п.4.2.

4.4. Высота насыпи $h_н$ и глубина вырезки торфа $H_в$ по условию допустимых упругих осадок $\lambda \leq [\lambda]$ определяют исходя из формулы (4).

В соответствии с формулой (4) условие $\lambda \leq [\lambda]$ в развернутом виде

$$\frac{q \cdot K_0}{C} \leq [\lambda]. \qquad (13)$$

В связи с тем, что K_0 является функцией h_0 и H и, учитывая, что для единицы подвижного состава данного типа q зависит только от h_0, формулу (13) можно упростить

$$\frac{K_q}{C} \leq [\lambda], \qquad (14)$$

где $K_q = q K_0$.

Кривые зависимости K_q от h_0 и H построены для четырехосных, шестиосных и восьмиосных вагонов рис.3,4 и

4.5. Расчет может быть выполнен по двум вариантам.

В а р и а н т I. При фиксированной высоте насыпи $h_н$ определяется необходимая глубина выторфовывания $H_в$.

В а р и а н т 2. При фиксированной глубине выторфовывания $H_в$ (в том числе $H_в = 0$) определяется необходимая высота насыпи.

4.6. При расчетах по обоим вариантам используется метод последовательных приближений.

4.7. Расчет по варианту I рекомендуется выполнять в следующей последовательности.

Задают некоторую начальную глубину выторфовывания $H_{в1}$.

Рассчитывают в соответствии с изложенным в разделе 3 величину упругой осадки $\lambda = \lambda_1$.

Сравнивают полученную величину упругой осадки λ_1 с допустимой $[\lambda]$.

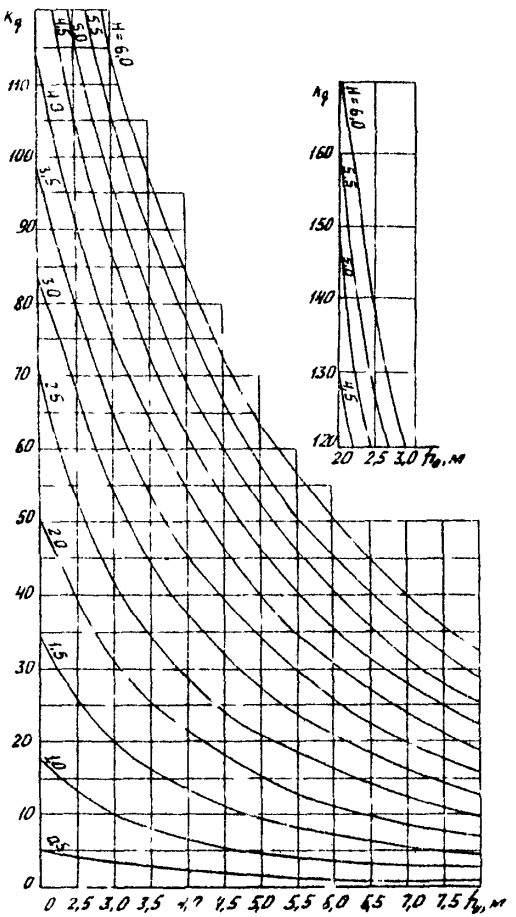


Рис.3. Кривые изменения функции K_q для четырехосных вагонов

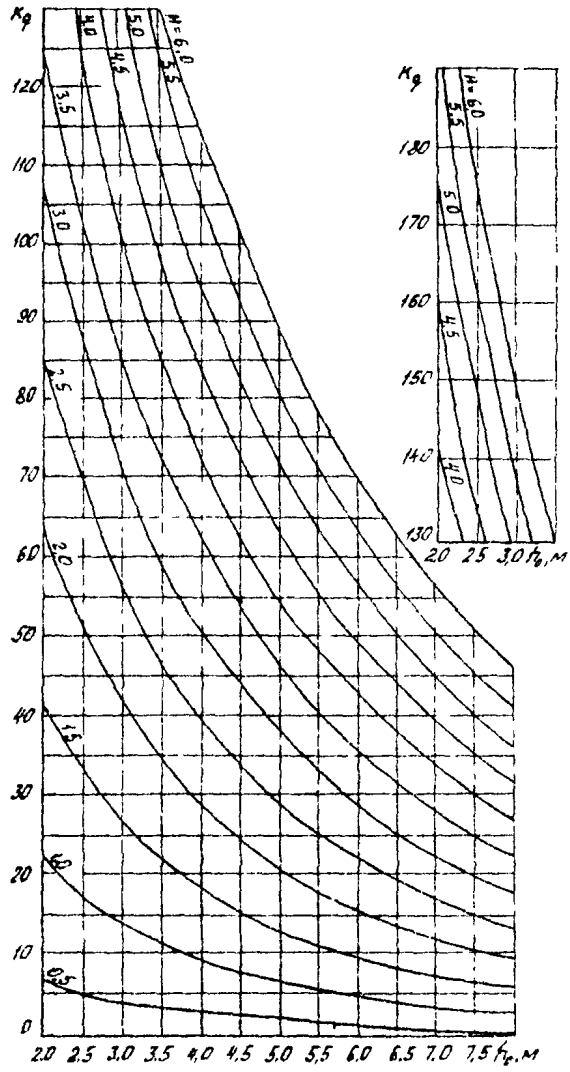


Рис.4. Кривые изменения функции K_q для шестиосных вагонов

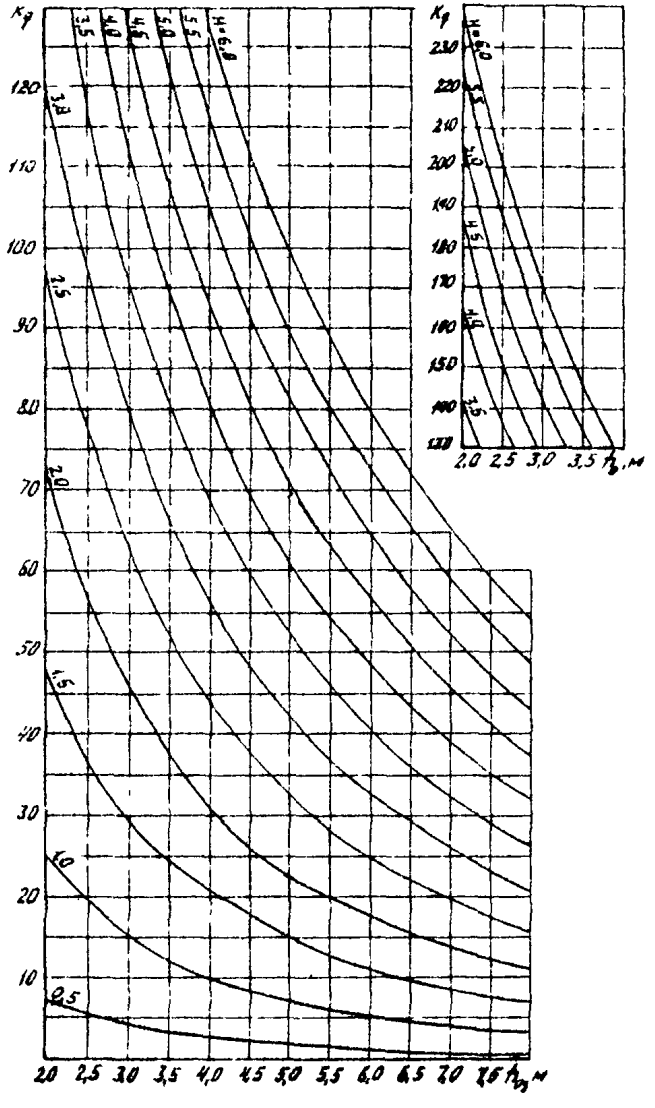


Рис.5. Кривые изменения функции K_g для восьмиосных вагонов

Если $\lambda_1 > [\lambda]$ (или если при $H_{B1} \neq 0 \lambda_1 < [\lambda]$), то задают новое значение глубины выторфовывания H_{B2} так, чтобы $H_{B2} > H_{B1}$ (или $H_{B2} < H_{B1}$), при этих условиях находят величину λ_2, сравнивают с $[\lambda]$ и т.д. Далее по двум, трем (или более) точкам строят кривую зависимости $\lambda = f(H_B)$ и графически находят такую глубину выторфовывания, при которой выполняется строгое равенство $\lambda = [\lambda]$.

4.8. Расчет необходимой высоты насыпи (вариант 2) выполняется в последовательности аналогичной расчету глубины выторфовывания.

4.9. Пример расчета глубины выторфовывания приведен в приложении 2, высоты насыпи – в приложении 3.

4.10. Уточненный многовариантный расчет необходимой высоты насыпи или глубины выторфовывания может быть выполнен на ЭВМ[I].

5. РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ДОСЫПКИ НАСЫПЕЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ПУТИ

5.1. Один из возможных способов снижения чрезмерных упругих осадок земляного полотна эксплуатируемого пути состоит в увеличении высоты насыпи.

5.2. Расчет величины досыпки насыпи выполняется с использованием формулы (4).

При этом особенностями расчета являются следующие:

упругая осадка эксплуатируемой насыпи под нагрузкой от той или иной единицы подвижного состава должна быть известна (измерена);

расчет дополнительной остаточной осадки насыпи вследствии ее досыпки производится с учетом воздействия нагрузки от подвижного состава.

I

К о р н я к С.Г. Расчет необходимой высоты железнодорожной насыпи на болоте и глубины выторфовывания по условию непревышения под нагрузкой от поездов упругой осадки заданной величины. Госфонд алгоритмов и программ, № П002685. Информационный бюллетень "Алгоритмы и программы". № 2. М..изд.ВНТИЦентр, 1978.

Методика расчета дополнительной остаточной осадки насыпи после ее досыпки

5.3. Вертикальные нормальные напряжения по оси пути в основании насыпи от ее веса без учета нагрузки от досыпки обозначим через $\sigma_{н1}$, с учетом досыпки через $\sigma_{н2}$.

5.4. Сжимающие напряжения в основании насыпи от поездной нагрузки для насыпи без досыпки обозначим через $\sigma_{п1}$, для насыпи с учетом досыпки – $\sigma_{п2}$.

Тогда увеличение сжимающих напряжений $\Delta\sigma_н$ вследствие досыпки насыпи

$$\Delta\sigma_н = \sigma_{н2} - \sigma_{н1}. \qquad (15)$$

Вследствие увеличения высоты насыпи напряжения в ее основании от поездной нагрузки одного и того же типа уменьшатся на величину $\Delta\sigma_п$, определенную по формуле

$$\Delta\sigma_п = \sigma_{п1} - \sigma_{п2}. \qquad (16)$$

Тогда суммарное (с учетом поездной нагрузки) повышение напряжений $\Delta\sigma$ в основании насыпи при увеличении ее высоты составит

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_н - \Delta\sigma_п. \qquad (17)$$

Напряжения от веса насыпи $\sigma_{н1}$ и $\sigma_{н2}$ с учетом веса верхнего строения пути могут быть определены с использованием рис.6,7 и 8. Напряжения от поездной нагрузки $\sigma_{п1}$ и $\sigma_{п2}$ – по таблице.

5.5. В качестве расчетной поездной нагрузки при определении остаточной осадки следует принимать массовую вагонную нагрузку.

5.6. В связи с тем, что реализация дополнительной осадки торфяного основания $S_ф$, вызванной досыпкой насыпи, будет происходить в течение длительного времени, рекомендуется:

для расчета на первые два года эксплуатации принимать $S_ф = 0$;

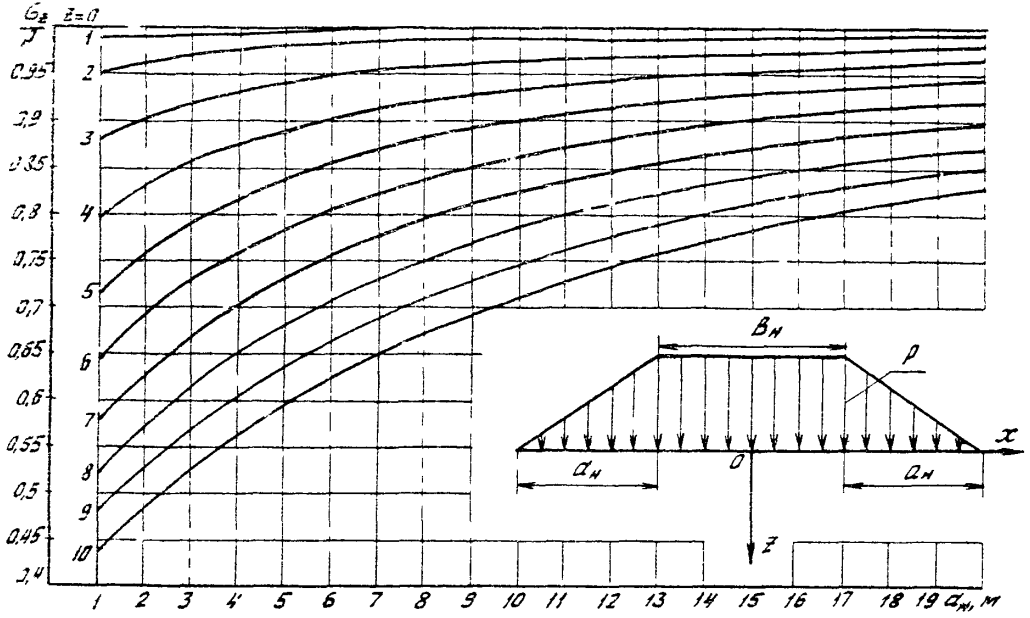


Рис.6. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений $\frac{\sigma_z}{p}$ в основании насыпи по оси пути при $B_н$ = 6,5 м

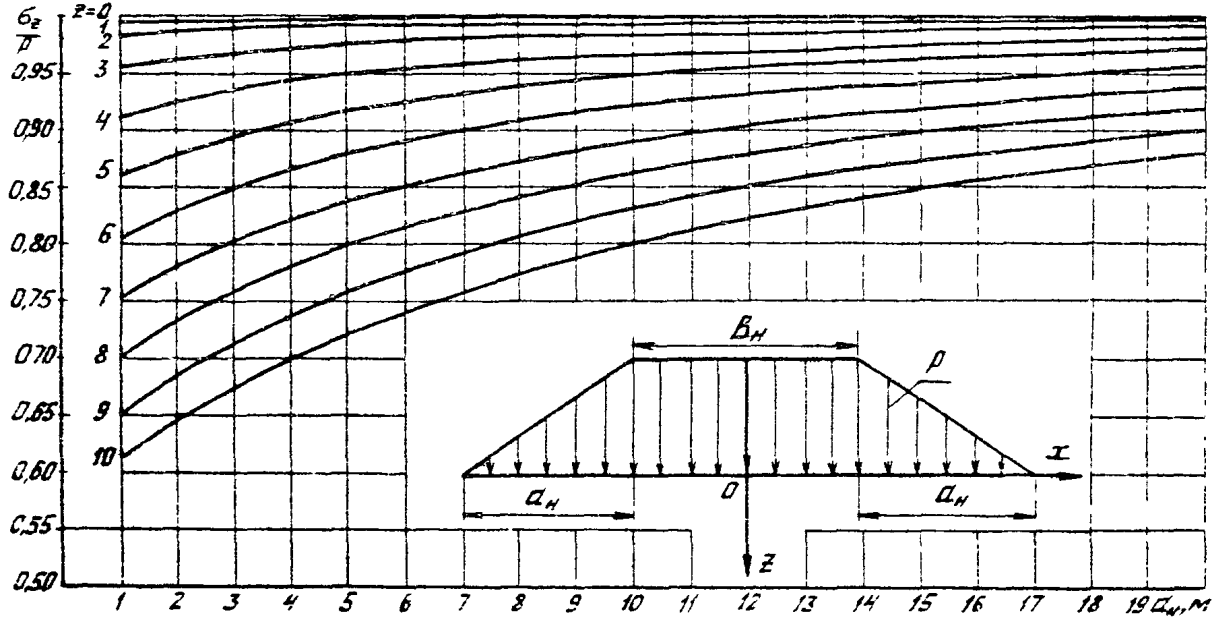


Рис.7. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений $\frac{\sigma_z}{p}$ в основании насыпи при $B_н$ = 10,6 м

для расчета S_q на период свыше двух лет и до шести лет эксплуатации принимать $\sigma_{пг} = 0$, при этом, если по формуле (17) окажется, что $\Delta\sigma \leq 0$, следует принимать $S_q = 0$;

для расчета на период шести лет эксплуатации и более осадку S_q определять с учетом компонентов напряжений от всех нагрузок, указанных в формулах (15)-(17).

5.7. Последовательность выполнения и детали расчета величины досыпки насыпи приведены в приложении 4.

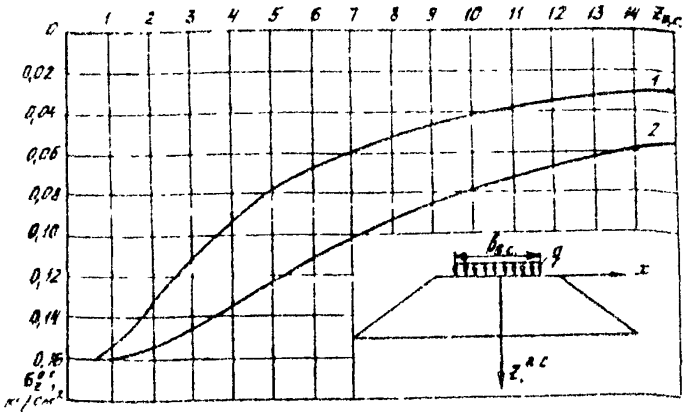


Рис.8. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений σ_z от нагрузки, создаваемой верхним строением пути:
1 – для однопутной линии $в_{вс} = 4{,}35$ м; $q = 0{,}16$ кг/см²; 2 – для двухпутной линии $в_{вс} = 8{,}70$ м; $q = 0{,}16$ кг/см²

Приложение I

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ УПРУГОЙ ОСАДКИ НАСЫПИ

Исходные данные

Проектируется насыпь высотой $h_н$ = 3 м, шириной поверху $B_н$ = 6,5 м, с заложением откосов I:I,5 на болоте глубиной $H_б$ = 6 м без выторфовывания. Толщина балластного слоя под шпалой $h_{бс}$ = 0,3 м.

Уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью болота. Плотность грунта насыпи γ = I,7 т/м^3. Плотность грунта насыпи ниже уровня грунтовых вод $\gamma_{взв}$ = I т/м^3. Деформируемость торфа под нагрузкой характеризуется компрессионной кривой рис.I.

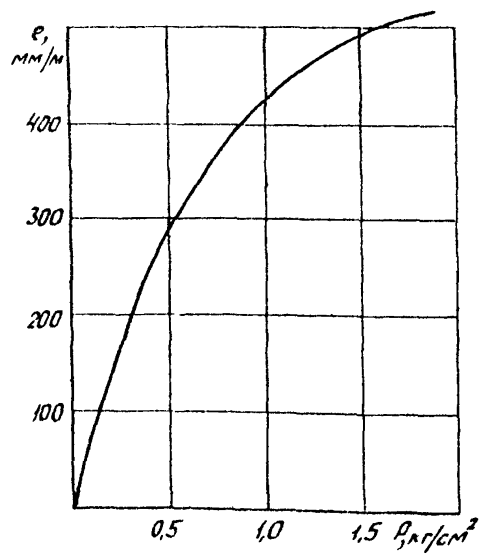


Рис.I. Компрессионная кривая торфа

Плотность скелета торфа в природном залегании $\gamma_{ск}^{0} = 0{,}13$ г/см^3. Требуется определить упругую осадку проектируемой насыпи под нагрузкой от электровоза ВЛ-60.

Расчет остаточной осадки насыпи

Расчет остаточной осадки насыпи S производится в соответствии с"Методическими указаниями по проектированию земляного полотна на слабых грунтах". М., Оргтрансстрой, 1968. При выполнении данного расчета могут быть использованы графики значений напряжений в основании насыпи от ее веса (рис.6 и 7) и графики напряжений от нагрузки, создаваемой весом верхнего строения пути (см.рис.8 настоящих Методических рекомендаций).

Значения напряжений $\frac{\sigma_z}{p}$ для насыпи однопутной линии с шириной основной площадки $B_н = 6{,}5$ м (см.рис.6) могут быть приняты без изменений для насыпей при 5,8 м$\leq B_н \leq$ 7 м. Значения напряжений $\frac{\sigma_z}{p}$ для насыпи двухпутной линии (см.рис.7) могут быть приняты без изменений для насыпей с шириной основной площадки $9{,}5 \leq B_н \leq$ 12 м.

В связи с тем, что осадка насыпи зависит от нагрузки, а нагрузка в свою очередь зависит от величины осадки расчет производится методом последовательных приближений.

Задаем величину остаточной осадки $S_{31} = 3$ м (50% от $H_б$).

Тогда удельная нагрузка на основание от веса насыпи p без учета нагрузки от веса верхнего строения пути

$$p = \gamma \cdot h_н + \gamma_{взв} \cdot S_{31} = 1{,}7 \cdot 3 + 1 \cdot 3 = 8{,}1\ т/м^2 = 0{,}81\ кг/см^2.$$

По рис.8 находим, что на глубине

$$z_{вс} = h_н + S_{31} = 3 + 3 = 6\ м$$

напряжение от веса верхнего строения $\sigma_{z1}^{вс} = 0{,}068 \approx 0{,}07$кг/см^2.

Таким образом, давление σ_1, приходящееся на поверхность торфа под насыпью, будет

$$\sigma_1 = p + \sigma_{z1}^{вс} = 0{,}81 + 0{,}07 = 0{,}88\ кг/см^2.$$

Подсчитываем величину напряжения σ_2 от веса насыпи

после ее осадки и веса верхнего строения на уровне нижней границы слоя торфа под насыпью.

По рис.6 при $z = H_б - S_{31} = 6 - 3 = 3$ м и $a_н = h_н \cdot 1{,}5 = 4{,}5$ м находим, что $\frac{\sigma_z}{p} = 0{,}935$. Тогда $\sigma_z = \frac{\sigma_z}{p} \cdot p = 0{,}935 \cdot 0{,}81 = 0{,}76$ кг/см^2.

По рис.8 находим, что на глубине

$z_{вс} = h_н + H_б = 3 + 6 = 9$ м; $\sigma_{zz}^{вс} = 0{,}047 \approx 0{,}05$ кг/см^2.

Тогда

$$\sigma_z = \sigma_z + \sigma_{zz}^{вс} = 0{,}76 + 0{,}05 = 0{,}81 \text{ кг/см}^2.$$

Будем считать, что напряжение от внешней нагрузки не затухает по глубине, а остается постоянным и равным значению σ_1.

При этом условии найдем величину осадки насыпи S_1. По рис.I данного приложения находим, что при $p = \sigma_1 = 0{,}88$ кг/см^2 $e = 400$ мм/м.

Тогда $S_1 = e \cdot H_б = 400$ мм/м $\cdot$ 6 м $= 2400$ мм $= 2{,}4$ м

Далее будем считать, что напряжение по глубине постоянно и равно σ_2.

При этом условии по рис.I $e = 385$ мм/м, а $S_2 = e \cdot H_б = 385$ мм/м $\cdot$ 6 м $= 2{,}31$ м.

Расчетная остаточная осадка насыпи в рассматриваемом случае S_{p1} находится внутри интервала $S_1 < S_{p1} < S_2$. Приближенно можно принять, что

$$S_{p1} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{2{,}4 + 2{,}31}{2} = 2{,}36 \text{ м}.$$

Так как $S_{p1} < S_{31}$, то задаемся величиной остаточной осадки $S_{32} < S_{p1}$. В частности, примем, что осадка $S_{32} = 1{,}5$ м (25% от $H_б$) и повторим расчет.

Аналогично предыдущему, нагрузка на основание от веса насыпи

$$q = \gamma \cdot h_н + \gamma_{взв} S_{32} = 1{,}7 \cdot 3 + 1 \cdot 1{,}5 = 6{,}6 \text{ т/м}^2 = 0{,}66 \text{ кг/см}^2.$$

По рис.8 настоящих Методических рекомендаций напряжения от веса верхнего строения на глубине

$z_{вс} = h_н + S_{32} = 3 + 1{,}5 = 4{,}5$ м

$\sigma_{z1} = 0{,}080 \approx 0{,}09$ кг/см^2.

Давление на основание насыпи

$$\sigma_1 = p + \sigma_{z1}^{вс} = 0{,}66 + 0{,}09 = 0{,}75 \text{ кг/см}^2.$$

По рис.6 настоящих Методических рекомендаций величина напряжения $\frac{\sigma_z}{p}$ на уровне нижней поверхности торфа от веса насыпи ($z = H_б - S_{32} = 6 - 1{,}5 = 4{,}5$ м и $a_н = 4{,}5$ м) будет 0,86.

Тогда $\sigma_z = 0{,}86 \cdot 0{,}66 \approx 0{,}57$ кг/см^2.

Напряжение от веса верхнего строения на уровне нижней поверхности торфа под насыпью будет по-прежнему $\sigma_{z2}^{вс} = 0{,}05$ кг/см^2.

В результате $\sigma_2 = \sigma_z + \sigma_{z2}^{вс} = 0{,}57 + 0{,}05 = 0{,}62$ кг/см^2. По рис.1 данного приложения находим, что при $p = \sigma_1 = 0{,}75$ кг/см^2 $e = 370$ мм/м.

Тогда $S_1 = e H_б = 370 \cdot 6 = 2220$ мм $= 2{,}22$ м.

При $p = \sigma_2 = 0{,}62$ кг/см^2; $e = 340$ мм/м.
Тогда $S_2 = 340 \cdot 6 = 2040$ мм $= 2{,}04$ м.

$$S_{p2} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{2{,}22 + 2{,}04}{2} = 2{,}13 \text{ м}.$$

Окончательно величину остаточной осадки S определим графическим способом. Для этого на рис.2 по оси абсцисс будем откладывать величину заданной осадки S_3, а по оси ординат в том же масштабе соответствующую величину расчетной осадки S_p.

На рис.2 наносим точки с координатами $S_{31} = 3$ м, $S_{p1} = 2{,}36$ м (точка 1) и с координатами $S_{32} = 1{,}5$ м, $S_{p2} = 2{,}13$ м (точка 2) и проводим через них прямую линию. Абсцисса (и ордината) точки пересечения этой прямой с биссектрисой координатного угла определит величину остаточной осадки S, которая в рассматриваемом примере оказалась равной 2,25 м.

Расчет упругой осадки насыпи

При известной величине остаточной осадки $S = 2{,}25$ м мощность насыпного слоя

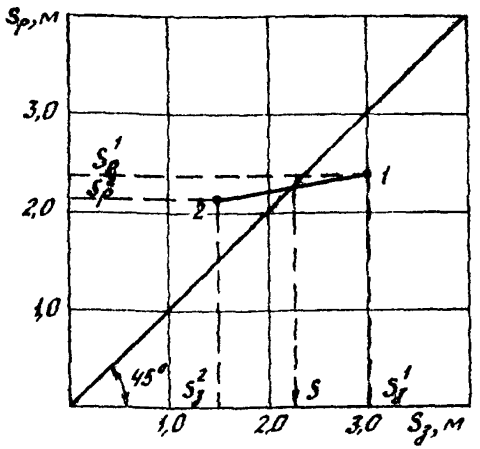


Рис.2. Расчет осадки графоаналитическим методом

$h_0 = h_{бс} + h_н + S = 0,3 + 3 + 2,25 = 5,55$ м.

Мощность торфа под насыпью

$H = H_б - S = 6 - 2,25 = 3,75$ м.

По формуле (I2) плотность скелета обжатого торфа под насыпью будет

$$\gamma_{ск} = 0,I3 \cdot \frac{6}{3,75} = 0,208 \text{ г/см}^3.$$

По табл.I при $h_0 = 5,55$ м для электровоза ВЛ-60, интерполируя, получим $\sigma_z = q = 0,086$ кг/см^2.
По рис.I настоящих Методических рекомендаций при $h_0 = 5,55$ м и $H = 3,75$ м определим значение $K_0 = 400$ мм.

По значению $\gamma_{ск} = 0,208$ г/см^3 по рис.2 находим величину модуля сдвига $C = I2,5$ кг/см^2.

По формуле (4) определяем величину упругой осадки насыпи под нагрузкой от электровоза ВЛ-60.

$$\lambda = \frac{0,086}{12,5} \cdot 400 = 2,75 \text{ мм.}$$

Можно дать вероятностную оценку величины упругой осадки λ в части, зависящей от величины модуля сдвига торфа. По рис.2 основного текста Методических рекомендаций (пунктирные линии) находим, что при $\gamma_{tr} = 0,208$ г/см^3, $G_{min} = 11,6$ кг/см^2, $G_{max} = 13,4$ кг/см^2.

Соответственно

$$\lambda_{max} = \frac{0,086}{11,6} \cdot 400 = 2,96 \approx 3 \text{ мм;}$$

$$\lambda_{min} = \frac{0,086}{13,4} \cdot 400 = 2,56 \text{ мм} \approx 2,5 \text{ мм.}$$

Таким образом, с вероятностью 0,9 в части, зависящей от величины G,

$$2,5 \text{ мм} < \lambda < 3 \text{ мм.}$$

С вероятностью 0,95 $\lambda < 3$ мм.

ПРИМЕР РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ГЛУБИНЫ ВЫТОРФОВЫВАНИЯ

Исходные данные

Проектируется насыпь высотой $h_н$ = 1,2 м, шириной поверху $B_н$ = 6,5 м, заложением откосов 1:1,5 на болоте глубиной $H_б$ = 6 м. Толщина бесплотного слоя под шпалой $h_{бс}$ = 0,3 м. Уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью болота. Плотность грунта насыпи γ = 1,7 т/м^3. Плотность грунта насыпи ниже уровня грунтовых вод $\gamma_{взв}$ = 1 т/м^3. Деформируемость торфа под нагрузкой характеризуется компрессионной кривой рис.1 приложения 1. Плотность скелета торфа в природном залегании $\gamma^0_{ск}$ =0,13г/см^3.

Железнодорожная линия II категории. Допустимая упругая осадка 2,5 мм. Расчетная нагрузка – восьмиосные вагоны с нагрузкой 21 т на ось. Требуется определить глубину выторфовывания, при которой упругая осадка насыпи λ не будет превышать 2,5 мм.

Расчет величины упругой осадки при условии возведения насыпи без выторфовывания $H_{б1}$ = 0

Определим остаточную осадку насыпи S_1 = 1,5 м. Расчет остаточной осадки выполняется аналогично приведенному в приложении 1.

Определим величину упругой осадки насыпи $\lambda = \lambda_1$. Мощность насыпного слоя

$$h_{б1} = h_{бс} + h_н + S_1 = 0,3 + 1,2 + 1,5 = 3 \text{ м}.$$

Мощность слоя торфа под насыпью

$$H_1 = H_б - S = 6 - 1,5 = 4,5 \text{ м}.$$

Плотность скелета торфа под насыпью $\gamma_{ск}$

$$\gamma_{ск} = \gamma^0_{ск} \cdot \frac{H_б}{H} = 0,13 \cdot \frac{6}{4,5} = 0,173 \text{ г/см}^3.$$

По рис. 5 настоящих Методических рекомендаций для нагрузки от восьмиосных вагонов при $h_0 = h_{01} = 3$ м и $H = H_1 = 4{,}5$ м

$$K_q = 128 \text{ мм·кг/см}^2.$$

Модуль сдвига торфа

$$G_1 = 1{,}39 \cdot (1{,}73)^3 = 7{,}2 \text{ кг/см}^2.$$

Тогда упругая осадка насыпи по формуле (14)

$$\lambda = \frac{K_q}{G_1} = \frac{128}{7{,}2} = 18 \text{ мм}.$$

Таким образом, получим $\lambda_1 > [\lambda]$ и для соблюдения требования $\lambda \le [\lambda]$ необходимо выполнить (в соответствии с условием задачи) выторфовывание.

Расчет величины осадки $\lambda = \lambda_2$ при условии возведения насыпи с выторфовыванием $H_{B2} = 1{,}5$ м

Определим величину остаточной осадки насыпи S_2. Будем считать, что поперечное сечение траншеи выторфовывания трапецеидальное. Глубина траншеи выторфовывания равна H_{B2}, а остальные ее геометрические размеры повторяют размеры насыпи.

Выше была определена остаточная осадка для насыпи без выторфовывания $S_1 = 1{,}5$ м, что составляет 25% от глубины болота $H_б$. В рассматриваемом случае при $H_{B2} = 1{,}5$ м нагрузка на основание будет больше, поэтому относительная осадка основания S_2 будет более 25%. Учитывая это, зададим осадку S_3 равной 30% от мощности обжимаемой толщи торфа $H_б'$, т.е. от $H_б' = H_б - H_B = 6$ м $- 1{,}5$ м $= 4{,}5$ м. Тогда $S_3 = 0{,}3 \cdot 4{,}5 = 1{,}35$ м.

Нагрузка на основание p будет

$$p = \gamma h_н + \gamma_{взв}(H_{B2} + S_2) = 1{,}7 \cdot 1{,}2 + 1\,(1{,}5 + 1{,}35) = 4{,}89 \text{ т/м}^2 = 0{,}489 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжение от веса верхнего строения $\sigma_z^{вс}$ на глубине $z_{вс} = h_н + H_{B2} + S_1 = 1{,}2 + 1{,}5 + 1{,}35 = 4{,}05$ по рис.8

основного текста Методических рекомендаций
$\sigma_z^{вс} = 0{,}092$ кг/см^2.

Таким образом, напряжение σ_1 на контакте насыпь-торф
$\sigma_1 = \rho + \sigma_z^{вс} = 0{,}489+0{,}092=0{,}581$ кг/см^2.

Найдем напряжение σ_2 от веса насыпи и верхнего строения на уровне нижней поверхности торфа под насыпью. По рис.6 при $\bar{z} = H_б - H_в - S_з = 6-1{,}5-1{,}35=3{,}15$ м и $a_н = \frac{b_н}{2} = 1{,}5 : 1{,}2 \cdot 1{,}5 = 1{,}8$ м находим, что $\frac{\sigma_z}{\rho} = 0{,}91$.

Тогда $\sigma_z = \frac{\sigma_z}{\rho} \cdot \rho = 0{,}91 \cdot 0{,}489=0{,}445$ кг/см^2.

По рис.8 находим, что на глубине

$z_{вс} = h_н + H_б = 1{,}2 + 6 = 7{,}2$ м;
$\sigma_z^{вс} = 0{,}05$ кг/см^2.

Тогда $\sigma_2 = \sigma_z + \sigma_z^{вс} = 0{,}445+0{,}05 \approx 0{,}5$ кг/см^2.

По рис.1 приложения 1 при $\rho = \sigma_1 = 0{,}58$ кг/см^2; $e = 320$ мм/м, тогда $S_2' = e(H_б - H_{в2}) = 320 \cdot (6 - 1{,}5) = 1440$ мм $= 144$ см. При $\rho = \sigma_2 = 0{,}5$ кг/см^2; $e = 290$ мм/м.

$S_2'' = 290\ (6 - 1{,}5) = 1305$ мм ≈ 130 см.

$S_2 = S_{расч} = \frac{144 + 130}{2} = 137$ см, что примерно равно заданной осадке $S_з$.

Определим величину упругой осадки насыпи $\lambda = \lambda_2$.

$h_{02} = h_{бс} + h_н + H_{в2} + S_2 = 0{,}3+1{,}2+1{,}5+1{,}37=4{,}37$ м;
$H_2 = H_б + H_{в2} - S_2 = 6-1{,}5-1{,}37 = 3{,}13$ м;

$\gamma_{ск} = \gamma_{ск}^0 \cdot \frac{H_б - H_{в2}}{H_2} = 0{,}13 \cdot \frac{4{,}5}{3{,}13} = 0{,}187$ г/см^3.

По рис.5 при $h_0 = h_{02} = 4{,}37$ м и $H = H_2 = 3{,}13$ м $K_q = 52$ мм·кг/см^2.
$\sigma_2 = 1{,}39\ (1{,}87)^3 = 1{,}39 \cdot 6{,}54 = 9{,}09$ кг/см^2;

$$\lambda_2 = \frac{\Delta q}{C_2} = \frac{22}{9{,}09} = 5{,}7 \text{ мм}.$$

Следовательно, принятая глубина выторфовывания $H_{в2} = 1{,}5$ м недостаточна. Примем глубину выторфовывания $H_{в3} = 3$ м.

Расчет величины упругой осадки при условии возведения насыпи с выторфовыванием $H_{в3} = 3$ м

Величина остаточной осадки $S_ƒ$, определенная расчетом аналогичным предыдущему, оказалась равной 103 см.

Упругая осадка насыпи

$$h_{э3} = 0{,}3 + 1{,}2 + 3 + 1{,}03 = 5{,}53 \text{ м};$$

$$H_3 = 6 - 3 - 1{,}03 = 1{,}97 \text{ м};$$

$$\gamma_{сл}^{*} = 0{,}13 \cdot \frac{3}{1{,}97} = 0{,}198 \text{ г/см}^3.$$

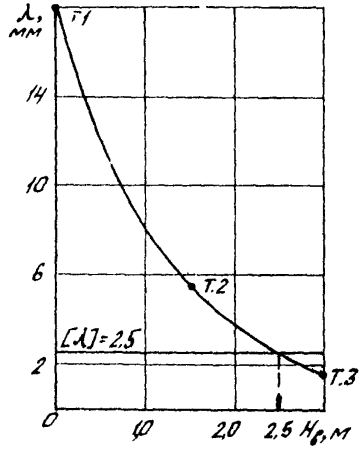
По рис.1 приложения 1 при $h_0 = h_{э3} = 5{,}53$ м и $H = H_3 = 1{,}97$ м $A_y = 19$ мм·кг/см^2;

$$C_3 = 1{,}39 \cdot (1{,}98)^8 = 10{,}8 \text{ кг/см}^2;$$

$$\lambda_3 = \frac{19}{10{,}8} = 1{,}76 \text{ мм}.$$

На рисунке наносим точки 1,2,3 с координатами ($H_{в1}, \lambda_1$), ($H_{в2}, \lambda_2$) и ($H_{в3}, \lambda_3$).

Соединяем эти точки плавной кривой и проводим прямую линию параллельную оси абсцисс с ординатой, равной допускаемой упругой осадке $[\lambda]$. Абсцисса точки пересечения этой прямой $\lambda = [\lambda]$ с кривой $\lambda = f(H_в)$ определит минимально необходимую по условию допустимой упругой осадки насыпи глубину выторфовывания $H_в$. В данном примере, как это следует из рисунка, необходимая величина $H_в = 2{,}5$ м.



Зависимость упругой осадки λ от глубины выторфовывания $H_в$

Приложение 3

ПРИМЕР РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ВЫСОТЫ НАСЫПИ

Исходные данные

Насыпь возводится без выторфовывания. Расчетная нагрузка – тепловоз ТЭ-II6. Остальные исходные данные совпадают с данными предыдущего примера расчета приложения 2.

Требуется определить минимально необходимую высоту насыпи $h_н$ по условию ее допустимой упругой осадки.

Расчет величины упругой осадки λ при высоте насыпи $h_н = h_{н1} = 3$ м

Остаточная осадка насыпи высотой 3 м $S_1 = 2{,}25$ (подсчитана ранее в приложении 2).

Упругая осадка λ_1 этой насыпи

$$h_{o1} = h_{бс} + h_{н1} + S_1 = 0{,}3+3+2{,}25 = 5{,}55 \text{ м};$$

$$H_1 = H_б - S_1 = 6 - 2{,}25 = 3{,}75 \text{ м};$$

$$\gamma_{ск1} = \gamma^{o}_{ск} \cdot \frac{H_б}{H_1} = 0{,}13 \cdot \frac{6}{3{,}75} = 0{,}208 \text{ г/см}^3.$$

$$G_1 = 1{,}39 \cdot (10\,\gamma_{ск1})^8 = 1{,}39 \cdot 9 = 12{,}5 \text{ кг/см}^2.$$

По таблице для тепловоза ТЭ-II6 при $z = h_o = h_{o1} = 5{,}55$ м интерполируя, находим $q = q_1 = 0{,}098$ кг/см^2.

По рис.I основного текста Методических рекомендаций при $h_{o1} = 5{,}55$ м и $H_1 = 3{,}75$ м $K_o = K_{o1} = 400$ мм.

Тогда $\lambda_1 = \frac{K_{o1}\, q}{G_1} = \frac{400 \cdot 0{,}098}{12{,}5} = 3{,}14$ мм.

Следовательно, принятая высота насыпи недостаточна.

Примем высоту насыпи $h_н = h_{н2} = 3{,}7$ м.

Расчет упругой осадки насыпи λ при условии $h_{н2} = 3{,}7$ м

В результате расчета остаточной осадки получ $S_2 = 2{,}44$ м.

Упругая осадка λ_2 насыпи

$h_{02} = 0,3 + 3,7 + 2,44 = 6,44$;

$H_2 = 6 - 2,44 = 3,56$ м;

$\gamma_{ск2} = 0,13 \cdot \frac{6}{3,56} = 0,219$ г/см^3;

$C_2 = 1,39 \cdot 2,19^3 = 14,6$ кг/см^2;

$q_2 = 0,081$ кг/см^2;

$K_{02} = 350$ мм;

$\lambda_2 = \frac{350 \cdot 0,081}{14,6} = 1,94$ мм.

В результате проведенных расчетов получено, что $\lambda_2 < [\lambda] < \lambda_1$. В связи с этим, в качестве третьего приближения следовало бы принять значение $h_н = h_{н3}$ такое, что $h_{н1} < h_{н3} < h_{н2}$, далее определить соответствующее значение упругой осадки λ_3, после чего по трем точкам построить кривую зависимости $\lambda = f(h_н)$ и графически найти значение $h_н$, при котором $\lambda = [\lambda]$.

Однако в данном случае, учитывая относительно небольшую разницу в значениях λ_1 и λ_2 и в соответствующих значениях $h_{н1}$ и $h_{н2}$ высоту насыпи $h_н$, при которой упругая осадка $\lambda = [\lambda] = 2,5$ мм, приближенно определяем с помощью линейной интерполяции.

Интерполяция может быть выполнена графически или аналитически:

$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = 3,14 - 1,94 = 1,2$ мм;

$\Delta h_н = h_2 - h_1 = 3,7 - 3 = 0,7$ м;

$h_н = h_{н1} + \frac{\Delta h_н}{\Delta\lambda}(\lambda_1 - [\lambda]) = 3 \text{ м} + \frac{0,7}{1,2}(3,14-2,5) = 3,4$ м.

Таким образом, требуемая высота насыпи 3,4 м.

Приложение 4

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ДОСЫПКИ НАСЫПИ

Исходные данные

Насыпь на болоте имеет высоту $h_б$ = 0,7 м. Часть насыпи ниже поверхности болота составляет δ = I,5 м. Толщина слоя балласта $h_{бс}$ = 0,3 м. Ширина основной площадки $B_н$ = 7 м. Заложение откосов I:I,5. Грунт тела насыпи выше уровня грунтовых вод имеет плотность $\gamma_н$ = I,7 т/м^3, ниже $\gamma_{взв}$ = I т/м^3. Уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью болота. Мощность торфа под насыпью H = 2 м. Сжимаемость торфа характеризуется компрессионной кривой рис.I приложения I. Величина измеренной упругой осадки насыпи $\lambda_и$ (по оси пути) под нагрузкой от тепловоза ТЭ-3 $\lambda_и$ = 2,9 мм. / Упругая осадка $\lambda_и$ может быть измерена и под воздействием вагона того или иного типа. При этом должна быть известна фактическая нагрузка на оси вагона

Требуется определить величину досыпки насыпи, при которой ее упругая осадка под воздействием восьмиосных вагонов с осевой нагрузкой 25 т не будет превышать 2 мм.

Плотность грунта, которым досыпается насыпь $\gamma_д$ = I,7 т/м^3.

Определение величины расчетной упругой осадки насыпи до ее досыпки под нагрузкой от восьмиосных вагонов

Толщина насыпи

$$h_н = h_н + \delta + h_{бс} = 0,7 + I,5 + 0,3 = 2,5 \text{ м}.$$

По рис.I основного текста Методических рекомендаций находим, что при $h_н$ = 2,5 м и H = 2 м значение K_0 = 205 мм. Величина $\sigma_z = q$ для тепловоза ТЭ-3 при $z = h_н$ = 2,5 м по таблице составляет 0,2I кг/см^2. Соответствующее значение σ_z для восьмиосных вагонов

с осевой нагрузкой 21 т по той же таблице составляет 0,278 кг/см^2. Значение напряжений для тех же вагонов, но с осевой нагрузкой 25 т может быть получено умножением напряжения $\sigma_z = q$ для вагонов с нагрузкой 21 т/ось на дробь 25/21. Для вагонов с нагрузкой 25 т $\sigma_z = q = 0{,}278 \cdot \frac{25}{21} = 0{,}331$ кг/см^2. Аналогично расчетная упругая осадка насыпи λ_p под воздействием этих вагонов будет в $t = 0{,}331/0{,}21$ раз больше чем упругая осадка, измеренная под нагрузкой от тепловоза ТЭ-3, т.е. под нагрузкой от восьмиосных вагонов.

$$\lambda_p = \lambda_u \cdot t = 2{,}9 \frac{0{,}331}{0{,}21} = 4{,}6 \text{ мм}.$$

Упругая осадка уменьшится, если увеличить высоту насыпи. Подсчитаем величину упругой осадки при увеличении высоты насыпи на 1,5 м.

Определение величины дополнительной остаточной осадки насыпи S_q

Нагрузка на основание p_1 от веса насыпи до ее досыпки

$p_1 = \gamma_н \cdot h_н + \gamma_{зз} \delta = 1{,}7 \cdot 0{,}7 + 1 \cdot 1{,}5 = 2{,}69$ т/м^2 $\approx$ 0,27 кг/см^2. По рис.8 напряжение $\sigma_z^{вс}$ от веса верхнего строения на глубине $z_{вс} = h_н + \delta = 0{,}7 + 1{,}5 = 2{,}2$ м равно 0,13 кг/см^2.

Таким образом, напряжение $\sigma'_{н1}$ от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на уровне поверхности контакта насыпь-торф будет

$$\sigma'_{н1} = p_1 + \sigma_z^{вс} = 0{,}27 + 0{,}13 = 0{,}4 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжение σ_z от веса насыпи на уровне нижней границы слоя торфа под насыпью находим по рис.6 при $r = H = 2$ м и $a_н = h_н \cdot 1{,}5 = 0{,}7 \cdot 1{,}5 = 1{,}05$ м.

В относительных единицах получим $\frac{\sigma_z}{p_1} = 0{,}95$.

Тогда $\sigma_z = \frac{\sigma_z}{p_1} \cdot p_1 = 0{,}95 \cdot 0{,}27 = 0{,}256$ кг/см^2.

На глубине $z_{вс} = h_н + \delta + H = 0{,}7 + 1{,}5 + 2 = 4{,}2$ м

По рис.8 $\sigma_{zвс} = 0{,}09$ кг/см^2.

Таким образом, напряжение $\sigma''_{н1}$ от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на уровне нижней границы слоя торфа будет

$$\sigma''_{н1} = \sigma_z + \sigma_z^{вс} = 0{,}256 + 0{,}09 \approx 0{,}35 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее значение напряжения $\sigma''_{н1}$ от постоянной нагрузки в основании насыпи

$$\sigma_{н1} = \frac{\sigma'_{н1} + \sigma_{н1}}{2} \qquad \frac{0{,}40 + 0{,}35}{2} \approx 0{,}37 \text{ кг/см}^2.$$

Для расчета напряжений от повозд $\sigma_{п1}$ в основании насыпи (до досыпки насыпи) принимаем нагрузку от четырехосных вагонов. Тогда на глубине $z = h_0 = 2{,}5$ м (т.е. на поверхности торфа) по таблице для четырехосных вагонов находим

$\sigma_z = \sigma'_{п1} = 0{,}192$ кг/см^2, а на глубине $z = h_0 + H = 2{,}5 + 2 = 4{,}5$ м (т.е. на уровне нижней границы слоя торфа)

$$\sigma_z = \sigma''_{п1} = 0{,}102 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее значение напряжения $\sigma_{п1}$ от временной нагрузки в основании насыпи

$$\sigma_{п1} = \frac{\sigma'_{п1} + \sigma''_{п1}}{2} = \frac{0{,}192 + 0{,}102}{2} = 0{,}147 \text{ кг/см}^2.$$

Тогда среднее значение напряжений $\sigma_1^{ср}$ в основании насыпи до ее досыпки от постоянной и временной нагрузок

$$\sigma_1^{ср} = \sigma_{н1} + \sigma_{п1} = 0{,}37 + 0{,}147 = 0{,}517 \approx 0{,}52 \text{ кг/см}^2.$$

Подсчитаем величину напряжений в основании насыпи после ее досыпки p_2 на $h_д = 1{,}5$ м.

Нагрузка на основание от веса насыпи увеличится на

$$\Delta p = \gamma_д \cdot h_д = 1{,}7 \cdot 1{,}5 = 2{,}55 = 0{,}255 \text{ кг/см}^2$$

и составит $p_2 = p_1 + \Delta p = 0{,}27 + 0{,}255 = 0{,}525$ кг/см^2.

Напряжение $\sigma_z^{вс}$ от веса верхнего строения на глубине

$$z_{вс} = h_н + h_д + \delta = 0{,}7 + 1{,}5 + 1{,}5 = 3{,}7$$

по рис.8 равно 0,1 кг/см^2.

Таким образом, напряжение $\sigma'_{н2}$ от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на поверхности основания

$$\sigma'_{н2} = p_2 + \sigma_z^{вс} = 0{,}525 + 0{,}1 \approx 0{,}62 \text{ кг/см}^2.$$

Найдем напряжение σ_z от веса насыпи после ее досыпки на уровне нижней границы слоя торфа. По рис.6 при $z = H = 2$ м и $a_н = (h_н + h_д) \cdot 1{,}5 = (0{,}7+1{,}5) \times 1{,}5 = 3{,}3$ м в относительных единицах получим

$$\frac{\sigma_z}{p_2} = 0{,}97.$$

Тогда $\sigma_z = \frac{\sigma_z}{p_2} \cdot p_2 = 0{,}97 \cdot 0{,}525 \approx 0{,}51$ кг/см^2.

По рис.8 на глубине $z_{вс} = h_д + h_н + \delta + H = 1{,}5 + 0{,}7 + 1{,}5 + 2 = 5{,}7$ м. $\sigma_{zвс} = 0{,}07$ кг/см^2.

Таким образом, напряжение $\sigma''_{н2}$ от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на уровне нижней границы слоя торфа

$$\sigma''_{н2} = 0{,}51 + 0{,}07 \approx 0{,}58 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее значение напряжения $\sigma_{н2}$ от постоянной нагрузки в основании насыпи после ее досыпки будет

$$\sigma_{н2} = \frac{\sigma'_{н2} + \sigma''_{н2}}{2} = \frac{0{,}62 + 0{,}58}{2} = 0{,}6 \text{ кг/см}^2.$$

Для расчета напряжений от поезда $\sigma_{п2}$ в основании насыпи после ее досыпки принимаем по-прежнему нагрузку от четырехосных вагонов [I].

Тогда на глубине $z = h_о + h_д = 2{,}5 + 1{,}5 = 4$ м (на поверхности основания) по таблице для четырехосных вагонов находим $\sigma_z = \sigma'_{п2} = 0{,}116$ кг/см^2, а на уровне нижней границы слоя торфа при $z = h_о + h_д + H = 2{,}5 + 1{,}5 + 2 = 6$ м. По таблице $\sigma_z = \sigma''_{п2} = 0{,}072$ кг/см^2.

Среднее значение напряжения $\sigma_{п2}$ от временной нагрузки в основании насыпи после ее досыпки

[I] При расчете на отдаленную перспективу рекомендуется для определения $\sigma_{п2}$ принимать перспективную массовую вагонную нагрузку. В данном примере это могут быть восьмиосные вагоны с осевой нагрузкой 25 т.

$$\sigma_{пz} = \frac{\sigma'_{пz} + \sigma''_{пz}}{2} = \frac{0,116 + 0,072}{2} = 0,094 \text{ кг/см}^2.$$

Таким образом, вследствие досыпки насыпи напряжения в ее основании от постоянной нагрузки увеличились на $\Delta\sigma_н = 0,6 - 0,37 = 0,23$ кг/см^2 (см.формулу (15)).

От временной нагрузки напряжения уменьшились на $\Delta\sigma_п = 0,147 - 0,094 \approx 0,05$ кг/см^2 (см.формулу (16)).

Суммарное повышение напряжений $\Delta\sigma$ в основании насыпи при увеличении ее высоты на 1,5 м определим по формуле (17)

$$\Delta\sigma = 0,23 - 0,05 = 0,18 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее значение напряжений $\sigma_2^{ср}$ в основании насыпи после ее досыпки от постоянной и временной нагрузок будет $\sigma_2^{ср} = \sigma_1^{ср} + \Delta\sigma = 0,52+0,18 = 0,7$ кг/см^2.

По рис.1 приложения 1 найдем, что под нагрузкой $\sigma_1^{ср} = 0,52$ кг/см^2 (до досыпки насыпи) модуль осадки $e_1 = 300$ мм/м, а под нагрузкой $\sigma_2^{ср} = 0,7$ кг/см^2 модуль осадки $e_2 = 360$ мм/м, т.е. увеличению нагрузки на основание на $\Delta\sigma = 0,18$ кг/см^2 соответствует модуль осадки $e = e_2 - e_1 = 360 - 300 = 60$ мм/м. Тогда дополнительная осадка основания $S_д$ насыпи мощностью $H = 2$ м вследствие досыпки насыпи будет

$$S_д = H \cdot e = 2 \cdot 60 = 120 \text{ мм} = 12 \text{ см}.$$

Таким образом, величину досыпки насыпи с запасом на последующую осадку следует принять на 12 см больше

$$h_д = 1,5 + 0,12 = 1,62 \text{ м}.$$

Расчет упругой осадки насыпи после ее досыпки

Все расчетные величины после досыпки насыпи обозначим с индексом $К$ (конечное).

Толщина насыпи после ее досыпки

$$h_{ск} = h_0 + h_д = 2,5 + 1,62 = 4,12 \text{ м}.$$

Из формул (7) и (12) можно получить формулу для определения отношения модуля сдвига торфа $G_к$ (после досыпки насыпи) к модулю G (до досыпки) через отношение соответствующих мощностей слоя торфа под насыпью $H_к$ и H :

$$\frac{G_к}{G} = \left(\frac{H}{H_к}\right)^3 = \left(\frac{2}{1{,}88}\right)^3 = 1{,}2.$$

По рис.1 основного текста Методических рекомендаций находим, что при $h_0 = h_{ок} = 4{,}12$ м и $H_к = 1{,}88$ м $K_0 = K_{ск} = 165$ мм. При $z = h_{ок} = 412$ м по таблице для восьмиосных вагонов (осевая нагрузка 21 т), интерполируя, получим $\sigma_z = 0{,}172$ кг/см^2. Для расчетных восьмиосных вагонов с осевой нагрузкой 25 т σ_z будет в 25/21 раз больше, т.е.

$$\sigma_z = q_к = 0{,}172 \cdot 25/21 = 0{,}205 \text{ кг/см}^2.$$

Из формулы (4) следует, что упругая осадка после досыпки насыпи $\lambda_к$, может быть определена через упругую осадку до досыпки насыпи $\lambda_р$ по формуле

$$\lambda_к = \lambda_р \frac{q_к \cdot K_{ок} \cdot G}{q \cdot K_q \cdot G_к}.$$

По приведенной формуле, используя результаты выполненных вычислений, найдем упругую осадку насыпи после досыпки на 1,62 м под расчетной нагрузкой

$$\lambda_к = 4{,}6 \cdot \frac{0{,}205 \cdot 165}{0{,}331 \cdot 205 \cdot 1{,}2} = 1{,}91 \approx 1{,}9 \text{ мм}.$$

Таким образом, досыпка насыпи на 1,6 м достаточна, чтобы исключить под воздействием восьмиосных вагонов с осевой нагрузкой 25 т упругие осадки более $[\lambda] = 2$ мм. Если расчет выполняется в предположении, что $S_q = 0$, то $G_к = G$ и формула для определения $\lambda_к$ будет иметь следующий вид

$$\lambda_к = \lambda_р \frac{q_к \cdot K_{ок}}{q \cdot K_0}$$

В частности, в рассматриваемом выше примере расчета упругая осадка $\lambda_к$ насыпи при $S_q = 0$

$$\lambda_к = 4{,}6 \frac{0{,}205 \cdot 165}{0{,}831 \cdot 205} = 2{,}28 \text{ мм}, \text{ что несколько}$$

выше $[\lambda] = 2$ мм.

gost.e-ecolog.ru