

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

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

Сданы в Главтрансстрой

Москва 1981

ПРЕДИСЛОВИЕ

Увеличение скоростей 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 выторцовывания), исходя из допустимых по условиям нормальной эксплуатации упругих осадок насыпей.

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

Работа выполнена в лаборатории конструкций земляного полотна ЦНИИСа. В проведении полевых инженерно-геологических обследований принимали участие сотрудники институтов Гипротранспути, Ленгипротранс и Кисогипротранс.

Замечания и предложения по работе направлять по адресу: 129329, Москва, Кольская ул., д.1, ЦНИИС.

Зам.директора института

Н.Б.Соколов

Зав.отделением земляного
полотна и верхнего
строения пути

Б.И.Цвялодуб

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие Методические рекомендации составлены в дополнение к действующим "Методическим указаниям по проектированию земляного полотна на слабых грунтах" (М., Оргтрансстрой, 1968) и содержит метод расчета высоты насыпи и глубины вырезки торфа из ее основания, исходя из требований, 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 ДУ-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 усиливии посредством увеличения высоты насыпи;

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

Принятая терминология

1.2. Толщина насыпи - высота ее над поверхностью болота, сложенная с глубиной выторфования 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. И положенные ниже методы расчета применяются при выполнении следующих двух условий.

1. Торф под насыпью находится ниже уровня грунтовых вод.

2. Мощность насыпного слоя проектируемого аэроматического полотна составляет величину не менее 2 м. На неодушевленных болотах условия I для насыпей, имеющих остаточную осадку более 80 см выполняются, 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-33-76 возвышении бровки "плавающей" насыпи над поверхностью болота не менее чем на 1,2 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 эпюри 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

$$\lambda = \frac{q(1+\mu)}{4\pi E(\alpha-\beta)} \left\{ (\alpha+x)^2 \ell_{sp} \left[1 + \frac{H^2}{(\alpha+x)^2} \right] + \right. \\ \left. + (\alpha-x)^2 \ell_{sp} \left[1 + \frac{H^2}{(\alpha-x)^2} \right] - (\beta+x)^2 \ell_{sp} \left[1 + \frac{H^2}{(\beta+x)^2} \right] - \right. \\ \left. - (\beta-x)^2 \ell_{sp} \left[1 + \frac{H^2}{(\beta-x)^2} \right] + H^2 \ell_{sp} \frac{(\alpha+x)^2 H^2 \beta (\alpha-x)^2 H^2}{[(\beta+x)^2 H^2][(\beta-x)^2 H^2]} \right\}, \quad (1)$$

где $\alpha = h_0 + \frac{\ell_{sp}}{2}$;

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 шпaler до поверхности контакта насыпь-торф, измеренное по оси пути);

ℓ_{sp} — длина шпaler;

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 (1) 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 (1) и подтверждено экспериментально, неравномерно по поперечному сечению насыпи: наряду с упругой осадкой по оси пути ($x=0$) в откосной части насыпи и 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 (1) при $X = 0$, имеет вид

$$\lambda = \frac{2(1+\mu)}{2\pi E(a-\beta)} \left[\alpha^2 \ell_{nl} \left(1 + \frac{H^2}{\alpha^2} \right) - \beta^2 \ell_{nl} \left(1 + \frac{H^2}{\beta^2} \right) + H^2 \ell_{nl} \left(\frac{\alpha^2 + H^2}{\beta^2 + H^2} \right) \right]. \quad (2)$$

Формула (1) преобразована к виду

$$\lambda = \frac{g}{G} \cdot K_x. \quad (3)$$

Формула (2)

$$\lambda = \frac{g}{G} \cdot K_0, \quad (4)$$

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

$$K_0 = \frac{1}{8\pi(a-\beta)} \left\{ (\alpha+x)^2 \ell_{nl} \left[1 + \frac{H^2}{(\alpha+x)^2} \right] + (a-x)^2 \ell_{nl} \left[1 + \frac{H^2}{(a-x)^2} \right] - (\beta+x)^2 \ell_{nl} \left[1 + \frac{H^2}{(\beta+x)^2} \right] - (\beta-x)^2 \ell_{nl} \left[1 + \frac{H^2}{(\beta-x)^2} \right] + H^2 \ell_{nl} \left[\frac{[(\alpha+x)^2 + H^2][(a-x)^2 + H^2]}{[(\beta+x)^2 + H^2][(\beta-x)^2 + H^2]} \right] \right\}; \quad (5)$$

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

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

Интенсивность полосовой нагрузки g принимается равной величине максимального нормального напряжения β_z от единицы подвижного состава данного типа на глубине $Z = h_o$.

Значения напряжений β_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_o и мощности торфа под насыпью. Кривые значения K_0 в зависимости от h_o и H при $2\beta = 1520$ мм и $\ell_{nl} = 2,75$ м приведены на рис. I

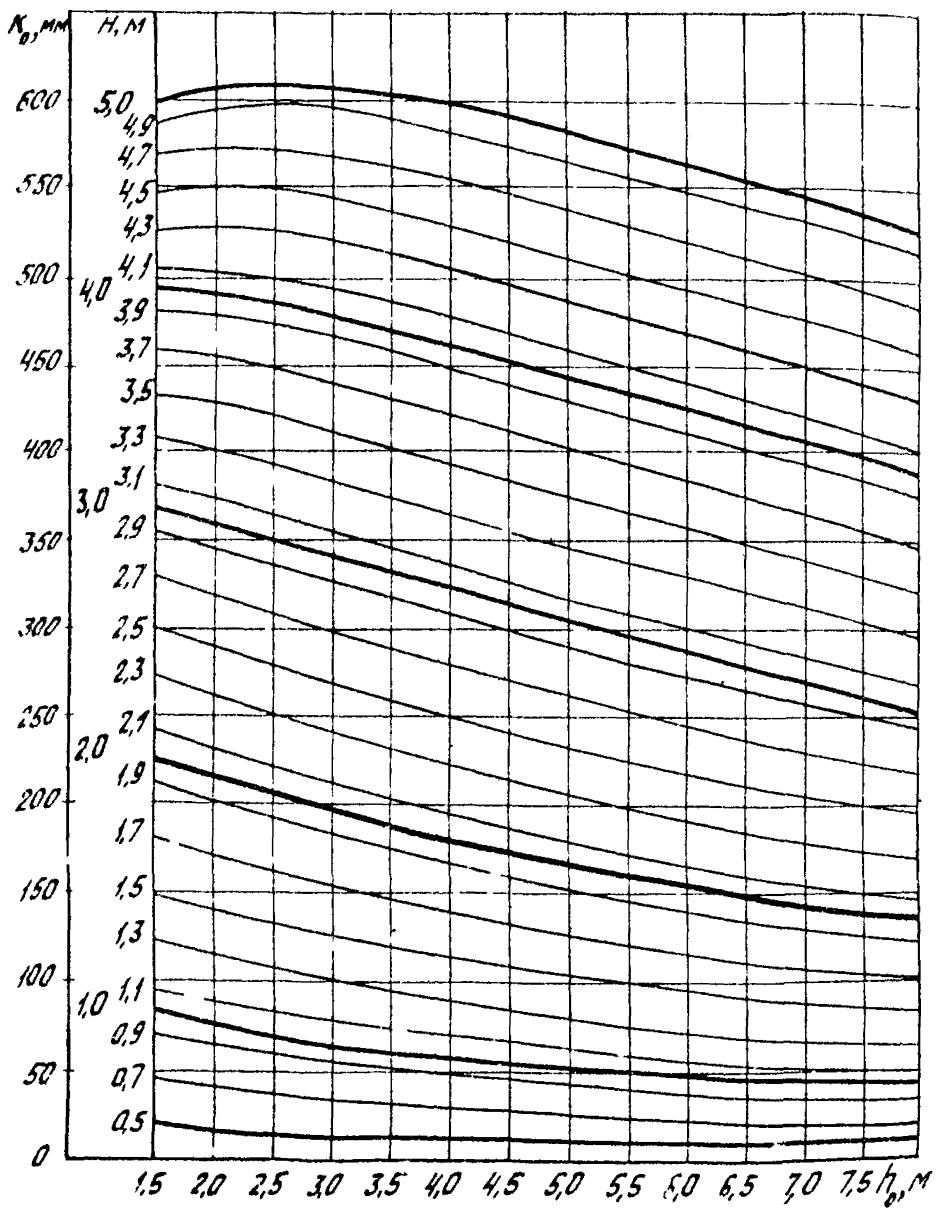


Рис. I. Кривые значений функции K_0

Рассстояние от центра колеса до оси шкворня, м насыпь-轨枕 настил-轨面	Электровозы												Вагоны						Тепловозы					
	19,5т	22т	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	
	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт	Мт
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

Приложения: 1. В скобках указаны нагрузки P_0 от колес на рельсы, при которых определяются напряжения σ_x .

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

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

Величина модуля сдвига торфа G (эмпирическое среднее) $\text{кг}/\text{см}^2$, определяется в зависимости от плотности скважины торфа f_{ck}^* , г/ см^3 , по корреляционной зависимости

$$G = 1391 f_{ck}^{*3} \approx 1,39 / (10 f_{ck}^{*3})^3 \quad (7)$$

Доверительный интервал, в котором при каждом фиксированном значении f_{ck}^* с вероятностью 0,9 находится теоретическое среднее значение модуля сдвига G_T , может быть найден по формуле:

$$G - \Delta G \leq G_T \leq G + \Delta G; \quad (8)$$

$$\Delta G = 0,4 \sqrt{3,5 + [(10 f_{ck}^{*3})^3 - 9,22]^2}. \quad (9)$$

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

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

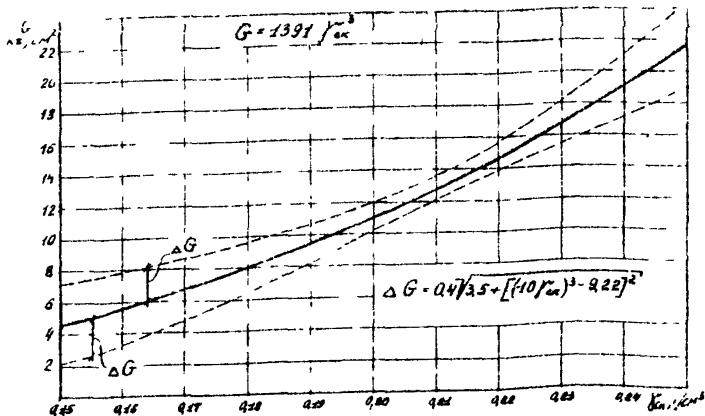


Рис.2. Зависимость модуля сдвига G от плотности торфа f_{ck}^* в основании насыпи

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ УПРУТОЙ 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_o по оси пути

$$h_o = h_{\delta c} + h_n + H_B + S + S_B, \quad (10)$$

где $h_{\delta c}$ - толщина балластного слоя под шпалой;

h_n - высота насыпи над поверхностью болота;

H_B - глубина выторfovивания;

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

S_B - остаточная осадка насыпи за счет выдавливания торфа.

3.3. Определяется мощность уплотненного торфа под насыпью H по формуле

$$H = H_B - H_B - S - S_B, \quad (II)$$

где H_B - мощность неуплотненного торфа (глубина болота).

3.4. Подсчитывается плотность скелета торфа под насыпью γ_{sk} :

$$\gamma_{sk}^o = \gamma_{sk}^o \frac{H_B - H_B}{H + S_B}, \quad (I2)$$

где γ_{sk}^o - плотность скелета торфа в естественной залежи.

В последующих примерах расчета принято $S_B = 0$.

3.5. По таблице определяется величина напряжения σ_z от единицы подвижного состава данного типа на глубине $Z = h_o$. Принимается $\sigma_z = \sigma'_z$.

3.6. По известным значениям h_o и H по рис. I или формуле (6) определяется величина K_o .

3.7. По значению γ_{sk} по рис. 2 или формуле (7) определяется величина модуля сдвига торфа G .

3.8. По формуле (4) находится величина упругой осадки и силы λ .

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

Необходимы 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 УСЛОВИЯМ ДОПУСТИМЫХ УПРУГИХ ОСАДОК НАСЫПЕЙ

4.1. Задача указанного расчета состоит в том, чтобы найти такую высоту насыпи h_n или такую глубину выторfovывания H_b , 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 из глубины $Z = h_o \geq 2m$ (см. таблицу).

При пропуске не находящихся в постоянном обращении элизодических нагрузок упругие осадки насыпи могут превышать величину, рекомендованной в п.4.2.

4.4. Высота насыпи h_s и глубина вырезки торфа H_s 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

$$\frac{g \cdot K_o}{G} \leq [\lambda]. \quad (13)$$

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

$$\frac{K_s}{G} \leq [\lambda], \quad (14)$$

где $K_s = g K_o$.

Кривые зависимости K_s от h_o и H построены для четырехосных, шестиосных и восьмиосных вагонов рис.3,4 и 4.5. Расчет может быть выполнен по двум вариантам.

Вариант I. При фиксированной высоте насыпи h_s определяется необходимая глубина выторфования H_s .

Вариант 2. При фиксированной глубине выторфования H_s (в том числе $H_s = 0$) 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 выторфования H_{s1} .

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

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

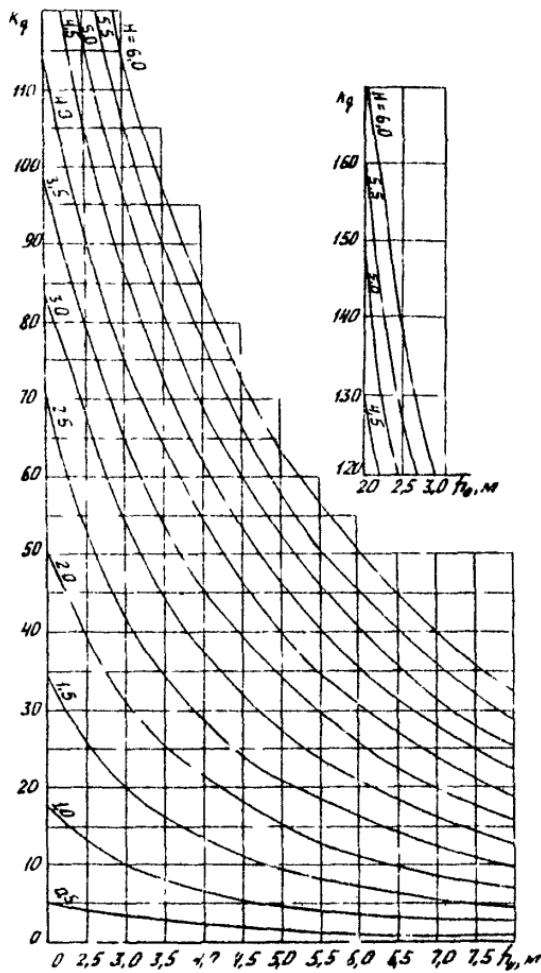


Рис. 3. Кривые изменения функции K_g для четырехосных вагонов

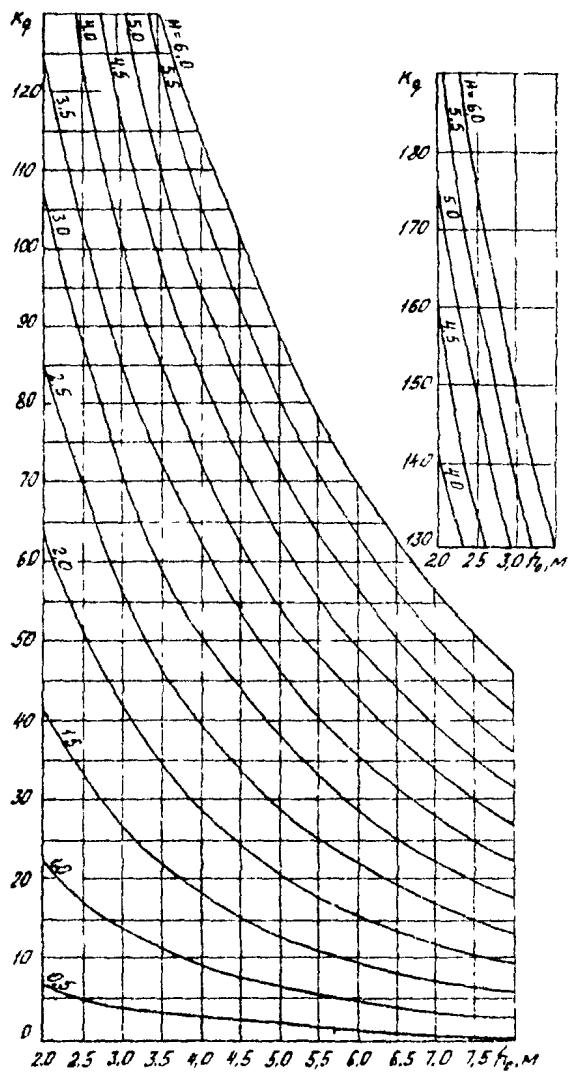


Рис.4. Кривые изменения функции K_g
для шестивесных вагонов

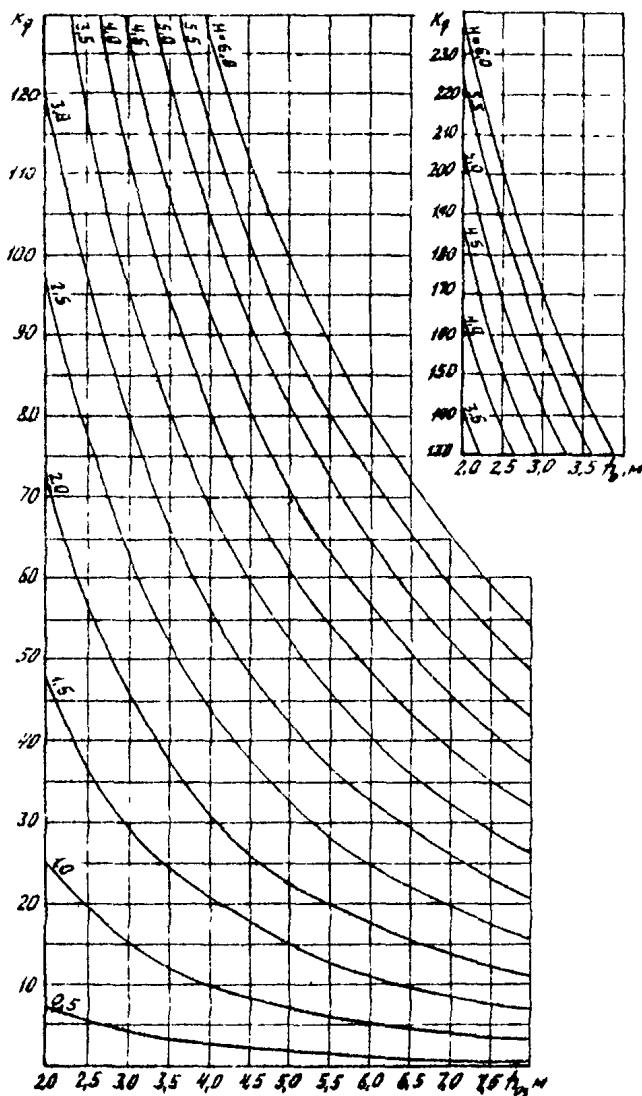


Рис. 5. Кривые изменения функции K_g
для восьмiosных вагонов

Если $\lambda_1 > [\lambda]$ (или если при $H_B \neq 0, \lambda_1 < [\lambda]$), то задают новое значение глубины выторfovывания H_{B2} так, чтобы $H_{B2} > H_B$, (или $H_{B2} < H_B$), 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 текущую глубину выторfovывания, при которой выполняется строгое равенство $\lambda = [\lambda]$.

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

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

4.10. Уточненный многовариантный расчет необходимой высоты насыпи или глубины выторfovывания может быть выполнен на ЭВМ¹.

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 вследствие ее досыпки производится с учетом воздействия нагрузки от подвижного состава.

I

Хорняк С.Г. Расчет необходимой высоты железо-дорожной насыпи из болота и глубины выторfovывания по условию непревышения под нагрузкой от поездов упругой осадки заданной величины. Госфонд алгоритмов и программ, № ПСО2685. Информационный бюллетень "Алгоритмы и программы". № 2. М.изд.ВНИЦентр, 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 σ_{n1} , с учетом досыпки через σ_{n2} .

5.4. Сжимающие напряжения в основании насыпи от поездной нагрузки для насыпи без досыпки обозначим через σ_{p1} , для насыпи с учетом досыпки — σ_{p2} .

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

$$\Delta\sigma_n = \sigma_{n2} - \sigma_{n1}. \quad (15)$$

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

$$\Delta\sigma_n = \sigma_{p1} - \sigma_{p2}. \quad (16)$$

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

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_n + \Delta\sigma_p. \quad (17)$$

Напряжения от веса насыпи σ_{n1} и σ_{n2} с учетом веса верхнего строения пути могут быть определены с использованием рис. 6, 7 и 8. Напряжения от поездной нагрузки σ_{p1} и σ_{p2} — по табличе.

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_g , вызванной досыпкой насыпи, будет происходить в течение длительного времени, рекомендуется:

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

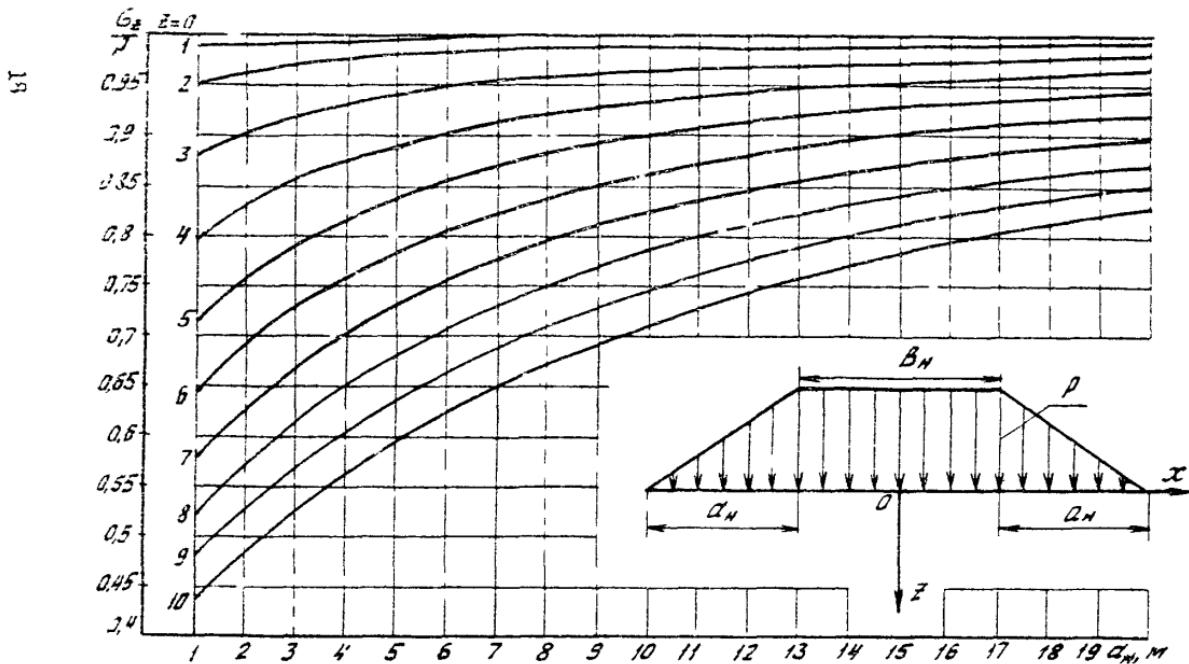


Рис.6. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений $\frac{\sigma_z}{\rho}$ в основании
насипи по оси пути при $B_n = 6,5 \text{ м}$

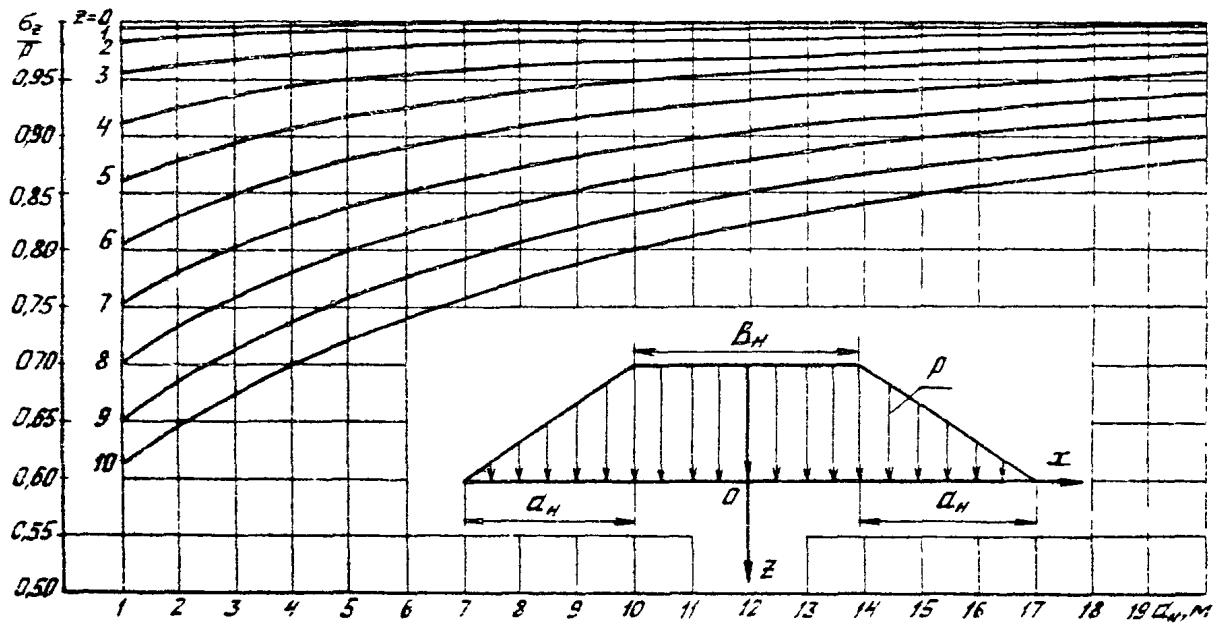


Рис.7. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений в основании насыпи при $B_{44} = 10,6 \text{ м}$

для расчета S_g на период свыше двух лет и до шести лет эксплуатации принимать $b_{n2} = 0$, при этом, если по формуле (17) окажется, что $\Delta b \leq 0$, следует принимать $S_g = 0$;

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

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

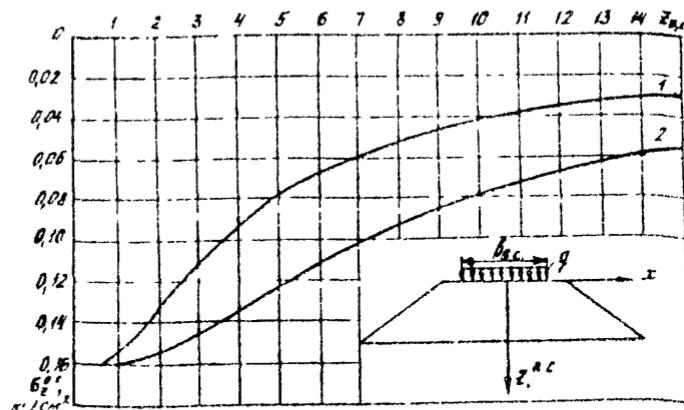


Рис.8. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений σ_z от нагрузки, создаваемой верхним строением пути:

1 - для однопутной линии $\sigma_{zc} = 4,35$ н;
 $q = 0,16$ кг/см²; 2 - для двухпутной линии
 $\sigma_{zc} = 8,70$ м; $q = 0,16$ кг/см²

Приложение I

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ УПРУГОЙ ОСАДКИ НАСЫПИ

И С Х О Д И Н Е Д А Н И Й

Проектируется насыпь высотой $h_n = 3$ м, шириной поверху $B_n = 6,5$ м, с заложением откосов 1:1,5 на болоте глубиной $H_f = 6$ м без выторцовывания. Толщина балластного слоя под шпалой $h_{\text{бл}} = 0,3$ м.

Уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью болота. Плотность грунта насыпи $\gamma' = 1,7 \text{ т}/\text{м}^3$. Плотность грунта насыпи ниже уровня грунтовых вод $\gamma'_{\text{ниж}} = 1 \text{ т}/\text{м}^3$. Деформируемость торфа под нагрузкой характеризуется компрессионной кривой рис. I.

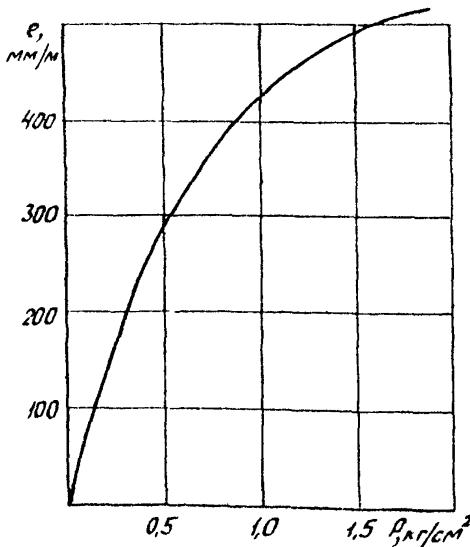


Рис. I. Компрессионная кривая торфа

Плотность скелета торфа в природном залегании $\gamma_{ск}^0 = 0,13 \text{ г/см}^3$. 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 $\frac{\sigma_z}{\rho}$ для насыпи однопутной линии с шириной основной площадки $B_n = 6,5 \text{ м}$ (см.рис.6) могут быть приняты без изменений для насыпей при $5,8 \leq B_n \leq 7 \text{ м}$. Значения напряжений $\frac{\sigma_z}{\rho}$ для насыпи двухпутной линии (см.рис.7) могут быть приняты без изменений для насыпей с шириной основной площадки $9,5 \leq B_n \leq 12 \text{ м}$.

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 $S_{st} = 3 \text{ м}$ (50% от H_S).

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

$$\rho = \gamma \cdot h_n + \gamma_{взр} \cdot S_{st} = 1,7 \cdot 3 + 1 \cdot 3 = 8,1 \text{ т/м}^2 = 0,81 \text{ кг/см}^2$$

По рис.8 находим, что на глубина

$$z_{sc} = h_n + S_{st} = 3 + 3 = 6 \text{ м}$$

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

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

$$\sigma_1 = \rho + \sigma_{z1}^{sc} = 0,81 + 0,07 = 0,88 \text{ кг/см}^2$$

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 $Z = H_f - S_{3f} = 6 - 3 = 3 \text{ м}$ и
 $\sigma_x = h_H \cdot 1,5 = 4,5 \text{ и}$ находим, что $\frac{\sigma_2}{\rho} = 0,935$.
 Тогда $\sigma_2 = \frac{\sigma_2}{\rho} \cdot \rho = 0,935 \cdot 0,81 = 0,76 \text{ кг/см}^2$.

По рис.8 находим, что на глубине
 $z_{sc} = h_H + H_f = 3 + 6 = 9 \text{ м}; \sigma_{z2}^{sc} = 0,047 \approx 0,05 \text{ кг/см}^2$.
 Тогда

$$\sigma_2 = \sigma_z + \sigma_{z2}^{sc} = 0,76 + 0,05 = 0,81 \text{ кг/см}^2.$$

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.1 данного приложения находим, что при $\rho = \sigma_1 = 0,88 \text{ кг/см}^2 e = 400 \text{ мм/м}$.

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

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

При этом условии по рис.1 $e = 385 \text{ мм/м}$, а
 $S_2 = e \cdot H_f = 385 \text{ мм/м} \cdot 6 \text{ м} = 2,31 \text{ м}$.
 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 $S_{p1} < S_{3f}$, то задаваемая величиной остаточной осадки $S_{32} < S_{p1}$. В частности, примем, что осадка $S_{32} = 1,5 \text{ м}$ (25% от H_f), и повторим расчет.

Аналогично предыдущему, нагрузка на основание от веса насыпи

$$q = f \cdot h_H + f_{sc} S_{32} = 1,7 \cdot 3 + 1 \cdot 1,5 = 6,6 \text{ т/м}^2 = 0,66 \text{ кг/см}^2.$$

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

$$\sigma_{sc} = h_H \cdot \sigma_{32} = 3 + 1,5 = 4,5 \text{ и} \\ \sigma_{z1} = 0,086 \approx 0,09 \text{ кг/см}^2.$$

Давление на основание насипи

$$\sigma_1 = \rho + \sigma_{x1}^{\delta c} = 0,66 + 0,09 = 0,75 \text{ кг/см}^2.$$

По рис.6 настоящих Методических рекомендаций величина напряжения $\frac{\sigma_x}{\rho}$ на уровне нижней поверхности торфа от веса насипи ($Z = H_5 - S_{32} = 6 - 1,5 = 4,5$ м и $a_s = 4,5$ м) будет 0,86.

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

Напряжение от веса верхнего строения на уровне нижней поверхности торфа под насипью будет по-прежнему $\sigma_{x2} = 0,05 \text{ кг/см}^2$.

В результате $\sigma_2 = \sigma_x + \sigma_{x2}^{\delta c} = 0,57 + 0,05 = 0,62 \text{ кг/см}^2$. По рис.1 данного приложения находим, что при $\rho = \sigma_1 = 0,75 \text{ кг/см}^2$ $e = 370 \text{ мм/м}$.

$$\text{Тогда } S_1 = e H_5 = 370 \cdot 6 = 2220 \text{ мм} = 2,22 \text{ м.}$$

$$\text{При } \rho = \sigma_2 = 0,62 \text{ кг/см}^2; e = 340 \text{ мм/м.}$$

$$\text{Тогда } S_2 = 340 \cdot 6 = 2040 \text{ мм} = 2,04 \text{ м.}$$

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

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 соотвествующую величину расчетной осадки S_p .

На рис.2 наносим точки с координатами $S_{31} = 3 \text{ м}$, $S_{32} = 2,36 \text{ м}$ (точка 1) и с координатами $S_{32} = 1,5 \text{ м}$, $S_{p2} = 2,13 \text{ м}$ (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 насипи

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

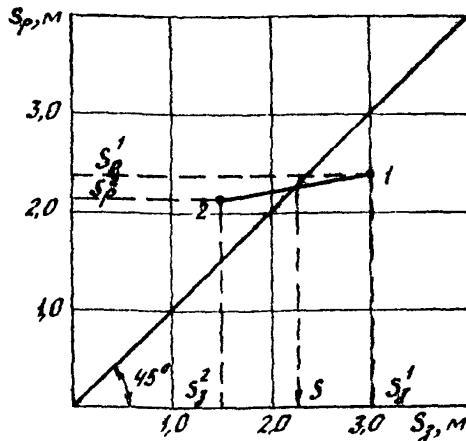


Рис.2. Расчет осадки гравиметрическим методом

$$h_o = h_{\delta o} + h_y + s = 0,3 + 3 + 2,25 = 5,55 \text{ м.}$$

Мощность торфа под насыпью

$$H = H_o - s = 6 - 2,25 = 3,75 \text{ м.}$$

По формуле (12) плотность скелета обжатого торфа под насыпью будет

$$\gamma_{sk}^t = 0,13 \cdot \frac{6}{3,75} = 0,208 \text{ г/см}^3.$$

По табл. I при $h_o = 5,55$ м для электровоза ВЛ-60, интерполируя, получим $b_g = q = 0,086 \text{ кг/см}^2$.

По рис. I настоящих Методических рекомендаций при $h_o = 5,55$ м и $H = 3,75$ м определим значение $K_0 = 400 \text{ мм.}$

По значению $\gamma_{sk}^t = 0,208 \text{ г/см}^3$ по рис. 2 находим величину модуля сдвига $E = 12,5 \text{ кг/см}^2$.

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 $\gamma'_{rk} = 0,208 \text{ г/см}^3$, $C_{min} = 11,6 \text{ кг/см}^2$, $C_{max} = 13,4 \text{ кг/см}^2$.

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 C ,

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

С вероятностью 0,95 $\lambda < 3 \text{ мм.}$

Приложение 2

ПРИМЕР РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ГЛУБИНЫ ВЫТОРФОВЫВАНИЯ

И с х о д и м ы е д а н и я

Проектируется насыпь высотой $h_n = 1,2$ м, шириной поверху $B_n = 6,5$ м, заложением откосов 1:1,5 на болоте глубиной $H_f = 6$ м. Толщина белластного слоя под насыпью $h_{fc} = 0,3$ м. Уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью болота. Плотность грунта насыпи $\gamma' = 1,7 \text{ т/м}^3$. Плотность грунта насыпи ниже уровня грунтовых вод $\gamma_{asb} = 1 \text{ т/м}^3$. Деформируемость торфа под нагрузкой характеризуется компрессионной кривой рис. I приложения I. Плотность скелета торфа в природном залегании $\gamma_{sk}^0 = 0,13 \text{ г/см}^3$.

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

Расчет величины упругой осадки при условии возведения насыпи без выторфования $H_{sf} = 0$

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

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

$$h_{so} = h_{fc} + h_n + S_1 = 0,3 + 1,2 + 1,5 = 3 \text{ м.}$$

Мощность слоя торфа под насыпью

$$H_s = H_f - S_1 = 6 - 1,5 = 4,5 \text{ м.}$$

Плотность скелета торфа под насыпью γ_{sk}^0

$$\gamma_{sk}^0 = \gamma_{sk}^0 \cdot \frac{H_f}{H} = 0,13 \cdot \frac{6}{4,5} = 0,173 \text{ г/см}^3.$$

По рис. 5 настоящих Методических рекомендаций для нагрузки от восьмиосных вагонов при $h_o = h_{o1} = 3$ м и $H = H_1 = 4,5$ м

$$K_g = 128 \text{ мм} \cdot \text{кг}/\text{см}^2.$$

Модуль сдвига торфа

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

Тогда упругая осадка насыпи по формуле (14)

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

Таким образом, получим $\lambda > [\lambda]$ и для обесцдения грабежения $\lambda \leq [\lambda]$ необходимо выполнить (в соответствии с условиями задачи) выторфование.

Расчет величины осадки
 $\lambda = \lambda_2$ при условии возва-
 дения насыпи с выторфовы-
 ванием $H_{B2} = 1,5$ м

Определим величину остаточной осадки насыпи S_2 . Будем считать, что поперечное сечение траншеи выторфования трапециoidalное. Глубина траншеи выторфования равна H_B , а осталльные ее геометрические размеры повторяют размеры насыпи.

Высота была определена остаточная осадка для насыпи без выторфования $S_1 = 1,5$ м, что составляет 25% от глубины болота H_B . 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_B , т.е. от $H_B' = H_B - H_B = 6 \text{ м} - 1,5 \text{ м} = 4,5 \text{ м}$. Тогда $S_3 = 0,3 \cdot 4,5 = 1,35 \text{ м}$.

Нагрузка на основание ρ будет

$$\rho = \gamma h_N + \gamma_{B2} (H_{B2} + S_3) = 1,7 \cdot 1,2 + 1 (1,5 + 1,35) = 4,89 \text{ кг}/\text{м}^2 = 0,489 \text{ кг}/\text{см}^2.$$

Напряжение от веса верхнего строения G_x^{B2} на глубине $Z_{B2} = h_N + H_{B2} + S_3 = 1,2 + 1,5 + 1,35 = 4,05$ по рис.8

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

Таким образом, напряжение σ_1 на контакте насыпь-торф

$$\sigma_1 = \rho + \sigma_z^{sc} = 0,489 + 0,092 = 0,581 \text{ кг/см}^2.$$

Найдем напряжение σ_2 от веса насыпи и верхнего строения на уровне нижней поверхности торфа под насыпью.

По рис.6 при $Z = H_\delta - H_{\theta_2} - S_f = 6 - 1,5 - 1,35 = 3,15 \text{ м}$

$$\alpha_H = \frac{h_H}{\rho} 1,5 = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \text{ м} \text{ иходим, что}$$

$$\frac{\sigma_2}{\rho} = 0,91.$$

$$\text{Тогда } \sigma_2 = \frac{\sigma_2}{\rho} \cdot \rho = 0,91 \cdot 0,489 = 0,445 \text{ кг/см}^2.$$

По рис.8 находим, что на глубине

$$Z_{sc} = h_H + H_\delta = 1,2 + 6 = 7,2 \text{ м};$$

$$\sigma_z^{sc} = 0,05 \text{ кг/см}^2.$$

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

По рис.1 приложения I при $\rho = \sigma_1 = 0,58 \text{ кг/см}^2$;
 $e = 320 \text{ мм/м, тогда } S'_2 = e(H_\delta - H_{\theta_2}) = 320.$
 $(6 - 1,5) = 1440 \text{ мм} = 144 \text{ см. При } \rho = \sigma_2 = 0,5 \text{ кг/см}^2;$
 $e = 290 \text{ мм/м.}$

$$S'_2 = 290 (6 - 1,5) = 1305 \text{ мм} \approx 130 \text{ см.}$$

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

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

$$h_{\theta_2} = h_{\theta_2} + h_H + H_{\theta_2} + S_2 = 0,3 + 1,2 + 1,5 + 1,37 = 4,37 \text{ м};$$

$$H_2 = H_\delta + H_{\theta_2} - S_2 = 6 - 1,5 - 1,37 = 3,13 \text{ м};$$

$$f_{ck} = f_{ck}^0 \cdot \frac{H_\delta - H_{\theta_2}}{H_2} = 0,13 \cdot \frac{4,5}{3,13} = 0,187 \text{ г/см}^3.$$

По рис.5 при $h_0 = h_{\theta_2} = 4,37 \text{ м}$ и $H = H_2 = 3,13 \text{ м}$
 $K_d = 52 \text{ мм} \cdot \text{кг/см}^2.$
 $\sigma_2 = 1,39 (1,8)^3 = 1,39 \cdot 6,54 = 9,09 \text{ кг/см}^2;$

$$\lambda_2 = \frac{r_2}{c_2} = \frac{52}{9,09} = 5,7 \text{ мм.}$$

Следовательно, принятая глубина выторfovывания $H_{B2} = 1,5 \text{ м}$ недостаточна. Примем глубину выторfovывания $H_{B3} = 3 \text{ м}$.

Расчет величины упругой осадки при условии возведения насыпи с выторfovыванием $H_{B3} = 3 \text{ м}$

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

Упругая осадка насыпи

$$h_{o3} = 0,3 + 1,2 + 3 + 1,03 = 5,53 \text{ м};$$

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

$$f_{ca} = 0,13 \cdot \frac{3}{1,97} = 0,198 \text{ г/см}^2.$$

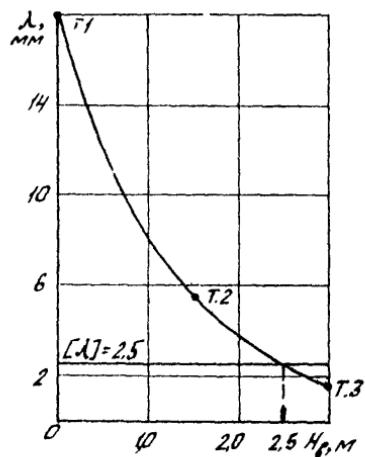
По рис. I приложения I при $h_0 = h_{o3} = 5,53 \text{ м}$
и $H = H_3 = 1,97 \text{ м}$ $\lambda_y = 19 \text{ мм}\cdot\text{кг}/\text{см}^2$;

$$G_3 = 1,39 \cdot (1,98)^2 = 10,8 \text{ кг}/\text{см}^2;$$

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

На рисунке наносим точки 1,2,3 с координатами (H_s, λ_1) , (H_{B2}, λ_2) и (H_{B3}, λ_3) .

Соединяя 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 $\lambda = f(H_s)$ определяет минимально необходимую по условию допустимой упругой осадки насыпи глубину выторfovывания H_s . В данном примере, как это следует из рисунка, необходимая величина $H_s = 2,5 \text{ м}$.



Зависимость упругой осадки λ от
глубины вытеснения H_0

Приложение 3

ПРИМЕР РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ВЫСОТЫ НАСЫПИ

И с х о д и н е д а н н и е

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

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

Расчет величины упругой осадки λ при высоте насыпи
 $h_H = h_{H1} = 3 \text{ м}$

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

Упругая осадка λ , этой насыпи

$$h_{o1} = h_{\delta c} + h_{H1} + S_1 = 0,3 + 3 + 2,25 = 5,55 \text{ м}; \\ H_1 = H_\delta - S_1 = 6 - 2,25 = 3,75 \text{ м};$$

$$\lambda_{cr1} = \lambda_{cr}^0 \cdot \frac{H_\delta}{H_1} = 0,13 \cdot \frac{6}{3,75} = 0,208 \text{ г/ом}^3.$$

$$G_1 = 1,39 \cdot (10 \gamma_{cr1})^3 = 1,39 \cdot 9 = 12,5 \text{ кг/см}^2.$$

По таблице для тепловоза ТЭ-II6 при $Z = h_o = h_{o1} = 5,55 \text{ м}$ интерполируя, находим $g = g_1 = 0,098 \text{ кг/см}^2$.

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

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

Следовательно, принятая высота насыпи недостаточна.

Принимаем высоту насыпи $h_H = h_{H2} = 3,7 \text{ м}$.

Расчет упругой осадки

насыпи λ при условиях

$$h_{H2} = 3,7 \text{ м}$$

В результате расчета остаточной осадки получим

$$S_2 = 2,44 \text{ м.}$$

Упругая осадка λ_2 насипи

$$h_{\lambda_2} = 0,3 + 3,7 + 2,44 = 6,44 \text{ ;}$$

$$H_2 = 6 - 2,44 = 3,56 \text{ м;}$$

$$\gamma_{c\lambda_2} = 0,13 \cdot \frac{6}{3,56} = 0,219 \text{ г/ом}^3;$$

$$G_2 = 1,39 \cdot 2,19^3 = 14,6 \text{ кг/ом}^2;$$

$$g_2 = 0,081 \text{ кг/ом}^2;$$

$$K_{\lambda_2} = 350 \text{ мм;}$$

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

В результате проведенных расчетов получено, что $\lambda_2 < [\lambda] < \lambda_1$. В связи с этим, в качестве третьего приближения следовало бы принять значение $h_H = h_{H3}$ такое, что $h_{H1} < h_{H3} < h_{H2}$, далее определить соответствующее значение упругой осадки λ_3 , после чего по трем точкам построить кривую зависимости $\lambda = f(h_H)$ и графически найти значение h_H , при котором $\lambda = [\lambda]$.

Однако в данном случае, учитывая относительно небольшую разницу в значениях λ_1 и λ_2 и в соответствующих значениях h_{H1} и h_{H2} высоту насипи h_H , при которой упругая осадка $\lambda = [\lambda] = 2,5$ мм, приближенно определяем с помощью линейной интерполяции.

Интерполяция может быть выполнена графически или аналитически:

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

$$\Delta h_H = h_2 - h_1 = 3,7 - 3 = 0,7 \text{ м;}$$

$$h_H = h_{H1} + \frac{\Delta h_H}{\Delta\lambda} (\lambda - [\lambda]) = 3 \text{ м} + \frac{0,7}{1,2} (3,14 - 2,5) = 3,4 \text{ м.}$$

Таким образом, требуемая высота насипи 3,4 м.

Приложение 4
ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ДОСЫПКИ НАСЫПИ

И с х о д о н и е д а н н и е

Насыпь на болоте имеет высоту $h_f = 0,7$ м. Часть насыпи ниже поверхности болота составляет $\delta = 1,5$ м. Толщина слоя балласта $h_{f,c} = 0,3$ м. Ширина основной площадки $B_N = 7$ м. Задолжение откосов $I:I,5$. Грунт тела насыпи выше уровня грунтовых вод имеет плотность $\gamma_f = 1,7 \text{ т}/\text{м}^3$, ниже $\gamma_{\text{взв}} = 1 \text{ т}/\text{м}^3$. 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 λ_u (по оси пути) под нагрузкой от тепловоза ТЭ-3 $\lambda_u = 2,9$ мм. / Упругая осадка λ_u 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
 $\gamma_f = 1,7 \text{ т}/\text{м}^3$.

О п р е д е л е н и е в е л и ч и н и р а с-
ч а т н о й у п р у г о й о с а д к и н а-
с y п i и д o з e д o с y п k i и н o д n a в g-
r u z k o y o t в o c y m i o s n y x
v a g o n o v

Толщина насыпи

$$h_o = h_f + \delta + h_{f,c} = 0,7 + 1,5 + 0,3 = 2,5 \text{ м.}$$

По рис. I основываясь текста Методических рекомендаций находим, что при $h_o = 2,5$ м и $H = 2$ м значение $K_o = 205$ мм. Величина $b_2 = f$ для тепловоза ТЭ-3 при $z = h_o = 2,5$ м по таблице составляет $0,21 \text{ кг}/\text{см}^2$. Соответствующее значение b_2 для восьмиосных вагонов

с осевой нагрузкой 21 т по той же таблице составляют $0,278 \text{ кг/см}^2$. Значение напряжений для тех же вагонов, но с осевой нагрузкой 25 т может быть получено умножением напряжения $\sigma_z = \rho$ для вагонов с нагрузкой 21 т/ось на дробь $25/21$. Для вагонов с нагрузкой 25 т $\sigma_z = \rho = 0,278 \cdot \frac{25}{21} = 0,331 \text{ кг/см}^2$. 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.

$$\lambda_p = \lambda_0 \cdot t = 2,9 \frac{0,331}{0,21} = 4,6 \text{ м.}$$

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_g

Нагрузка на основание ρ_1 от веса насыпи до ее досыпки

$$\rho_1 = \gamma_h \cdot h_h + \gamma_{\text{дсы}} \delta = 1,7 \cdot 0,7 + 1 \cdot 1,5 = 2,69 \text{ т/м}^2 \approx 0,27 \text{ кг/см}^2. \text{ По рис.8 напряжение } \sigma_z^{sc} \text{ от веса верхнего строения на глубине } z_{sc} = h_h + \delta = 0,7 + 1,5 = 2,2 \text{ м равно } 0,13 \text{ кг/см}^2.$$

Таким образом, напряжение σ_z^{sc} от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на уровне поверхности контакта насыпь-торф будет

$$\sigma_z^{sc} = \rho_1 + \sigma_z^{sc} = 0,27 + 0,13 = 0,4 \text{ кг/см}^2.$$

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

В относительных единицах получим $\frac{\sigma_z}{\rho_1} = 0,95$.

Тогда $\sigma_z = \frac{\sigma_z}{\rho_1} \cdot \rho_1 = 0,95 \cdot 0,27 = 0,256 \text{ кг/см}^2$.

На глубина $z_{sc} = h_h + \delta + r = 0,7 + 1,5 + 2 = 4,2 \text{ м}$

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

Таким образом, напряжение σ_{H1} от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на уровне нижней границы слоя торфа будет

$$\sigma_{H1} = \sigma_z + \sigma_{sc} = 0,256 + 0,09 \approx 0,35 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее значение напряжения σ_{H1} от постоянной нагрузки в основании насыпи

$$\bar{\sigma}_{H1} = \frac{\sigma'_{H1} + \sigma''_{H1}}{2} = \frac{0,40 + 0,35}{2} \approx 0,37 \text{ кг/см}^2.$$

Для расчета напряжений от поезда σ_{p1} в основании насыпи (до досыпки насыпи) принимаем нагрузку от четырехосных вагонов. Тогда на глубине $Z = h_0 = 2,5 \text{ м}$ (т.е. на поверхности торфа) по таблице для четырехосных вагонов находим

$\sigma_z = \sigma'_{p1} = 0,192 \text{ кг/см}^2$, а на глубине $Z = h_0 + H = 2,5 + 2 = 4,5 \text{ м}$ (т.е. на уровне нижней границы слоя торфа)

$$\sigma_z = \sigma''_{p1} = 0,102 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее значение напряжения σ_{p1} от временной нагрузки в основании насыпи

$$\bar{\sigma}_{p1} = \frac{\sigma'_{p1} + \sigma''_{p1}}{2} = \frac{0,192 + 0,102}{2} = 0,147 \text{ кг/см}^2.$$

Тогда среднее значение напряжений σ_p в основании насыпи до ее досыпки от постоянной и временной нагрузок

$$\sigma_p = \bar{\sigma}_{H1} + \bar{\sigma}_{p1} = 0,37 + 0,147 = 0,517 \approx 0,52 \text{ кг/см}^2.$$

Подсчитаем величину напряжений в основании насыпи после ее досыпки P_2 на $h_2 = 1,5 \text{ м}$.

Нагрузка на основание от веса насыпи увеличится на

$$\Delta P = \rho_2 \cdot h_2 = 1,7 \cdot 1,5 = 2,55 = 0,255 \text{ кг/см}^2$$

и составит $\sigma_z = \sigma_p + \Delta P = 0,27 + 0,255 = 0,525 \text{ кг/см}^2$.

Напряжение σ_z^{sc} от веса верхнего строения на глубине

$$Z_{sc} = h_H + h_2 + \delta = 0,7 + 1,5 + 1,5 = 3,7$$

по рис.8 равно $0,1 \text{ кг/см}^2$.

Таким образом, напряжение σ'_{n2} от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на поверхности основания

$$\sigma'_{n2} = \rho_2 + \sigma_z^{sc} = 0,525 + 0,1 \approx 0,62 \text{ кг/см}^2.$$

Найдем напряжение σ_z от веса насыпи после ее досыпки на уровне нижней границы слоя торфа. По рис.6 при

$$z = H = 2 \text{ м и } \alpha_h = (h_H + h_g) \cdot 1,5 = (0,7 + 1,5) \cdot 1,5 = 3,3 \text{ м в относительных единицах получим}$$

$$\text{Тогда } \sigma_z = \frac{\sigma_z}{\rho_2} \cdot \rho_2 = 0,97 \cdot 0,525 \approx 0,51 \text{ кг/см}^2.$$

$$\text{По рис.8 на глубине } z_{sc} = h_g + h_H + \delta + H = 1,5 + 0,7 + 1,5 + 2 = 5,7 \text{ м. } \sigma_{zsc} = 0,07 \text{ кг/см}^2.$$

Таким образом, напряжение σ''_{n2} от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на уровне нижней границы слоя торфа

$$\sigma''_{n2} = 0,51 + 0,07 \approx 0,58 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее значение напряжения σ_{n2} от постоянной нагрузки в основании насыпи после ее досыпки будет

$$\sigma_{n2} = \frac{\sigma'_{n2} + \sigma''_{n2}}{2} = \frac{0,62 + 0,58}{2} = 0,6 \text{ кг/см}^2.$$

Для расчета напряжений от поезда σ_{n2} в основании насыпи после ее досыпки принимаем по-прежнему нагрузку от четырехосных вагонов I .

Тогда на глубинах $z = h_o + h_g = 2,5 + 1,5 = 4 \text{ м}$ (на поверхности основания) по таблице для четырехосных вагонов находим $\sigma_z = \sigma_{n2} = 0,116 \text{ кг/см}^2$, а на уровне нижней границы слоя торфа при $z = h_o + h_g + H = 2,5 + 1,5 + 2 = 6 \text{ м}$. По таблице $\sigma_z = \sigma_{n2} = 0,072 \text{ кг/см}^2$.

Среднее значение напряжения σ_{n2} от временной нагрузки в основании насыпи после ее досыпки

^I При расчете на отдаленную перспективу рекомендуется для определения σ_{n2} принимать перспективную массовую вагонную нагрузку. В данном примере это могут быть восьмiosные вагоны с осевой нагрузкой 25 т.

$$\bar{b}_{n2} = \frac{\bar{b}_{n2}' + \bar{b}_{n2}''}{2} = \frac{0,116 + 0,072}{2} = 0,094 \text{ кг/см}^2.$$

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

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

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

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

Среднее значение напряжений \bar{b}_2^{cp} в основании насыпи после ее досыпки от постоянной и временной нагрузок будет $\bar{b}_2^{cp} = \bar{b}_1^{cp} + \Delta b = 0,52 + 0,18 = 0,7 \text{ кг/см}^2$.

По рис. I приложения I найдем, что под нагрузкой $b_1^{cp} = 0,52 \text{ кг/см}^2$ (до досыпки насыпи) модуль осадки $e_1 = 300 \text{ мм/м}$, а под нагрузкой $b_2^{cp} = 0,7 \text{ кг/см}^2$ модуль осадки $e_2 = 360 \text{ мм/м}$, т.е. увеличению нагрузки на основание на $\Delta b = 0,18 \text{ кг/см}^2$ соответствует модуль осадки $e = e_2 - e_1 = 360 - 300 = 60 \text{ мм/м}$. Тогда дополнительная осадка основания S_2 насыпи мощностью $H = 2 \text{ м}$ вследствие досыпки насыпи будет

$$S_2 = H \cdot e = 2 \cdot 60 = 120 \text{ мм} = 12 \text{ см}.$$

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

$$h_2 = 1,5 + 0,12 = 1,62 \text{ м.}$$

Расчет упругой насыпи
после ее досыпки

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

Толщина насыпи после ее досыпки

$$h_{ok} = h_0 + h_2 = 2,5 + 1,62 = 4,12 \text{ м.}$$

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

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

По рис. I основного текста методических рекомендаций находим, что при $h_o - h_{ok} = 4,12$ м и $H_k = 1,88$ м $K_o = K_{ok} = 165$ мм. При $z = h_{ok} = 412$ м по таблице для восьмивозочных вагонов (осевая нагрузка 21 т), интерполируя, получим $\beta_z = 0,172$ кг/см². Для расчетных восьмивозочных вагонов с осевой нагрузкой 25 т β_z будет в 25/21 раз больше, т.е.

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

Из формулы (4) следует, что упругая осадка после досыпки насыпи λ_k , может быть определена через упругую осадку до досыпки насыпи λ_p по формуле

$$\lambda_k = \lambda_p \frac{q_k \cdot K_{ok} \cdot G}{q \cdot K_q \cdot G_k}.$$

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

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

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

$$\lambda_k = \lambda_p \frac{q_k \cdot K_{ok}}{q \cdot K_q}$$

В частности, в рассматриваемом выше примере расчета упругая осадка λ_k насыпи при $S_g = 0$

$$\lambda_k = 4,6 \frac{0,205 \cdot 165}{0,831 \cdot 205} = 2,28 \text{ мм, что несколько выше } [\lambda] = 2 \text{ мм.}$$