

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

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

Одобрены Главтранспроектom

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 выторфовывания) исходя из допустимых по условиям нормальной эксплуатации упругих осадок насыпей.

Методические рекомендации разработаны канд. техн. наук С.Г.Жорняком 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 ЦНИИС. 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.1, ЦНИИС.

Зам.директора института

Н.Б.Сokolov

Зав.отделением земляного
полотна и верхнего
строения пути

Б.И.Цвелодуб

1. 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 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 IV-V 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 укреплении 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, сложившаяся с глубиной выторфовывания и величиной осадки основания насыпи по оси пути.

Мощность насыпного слоя — толщина насыпи, сложившаяся 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 поезда нагрузки.

Основные расчетные предпосылки

1.3. Изложенные ниже методы расчета применяются при выполнении следующих двух условий.

1. 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 1 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 П-33-76 о возвышении бровки "плавающей" насыпи над поверхностью болота не менее чем на 1,2 м) также и условие 2.

1.4. Исследования, проведенные в ЦНИИСе, показали, что при условиях 1 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.

1.5. 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

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

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 (1) при $X = 0$, имеет вид

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

Формула (1) преобразована к виду

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

Формула (2)

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

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

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

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

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

Интенсивность полосовой нагрузки q принимается равной величине максимального нормального напряжения σ_2 от единицы подвижного состава данного типа на глубине $Z = h_0$.

Значения напряжений σ_2 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 $l_{\text{кп}} = 2,75$ м приведены на рис. 1

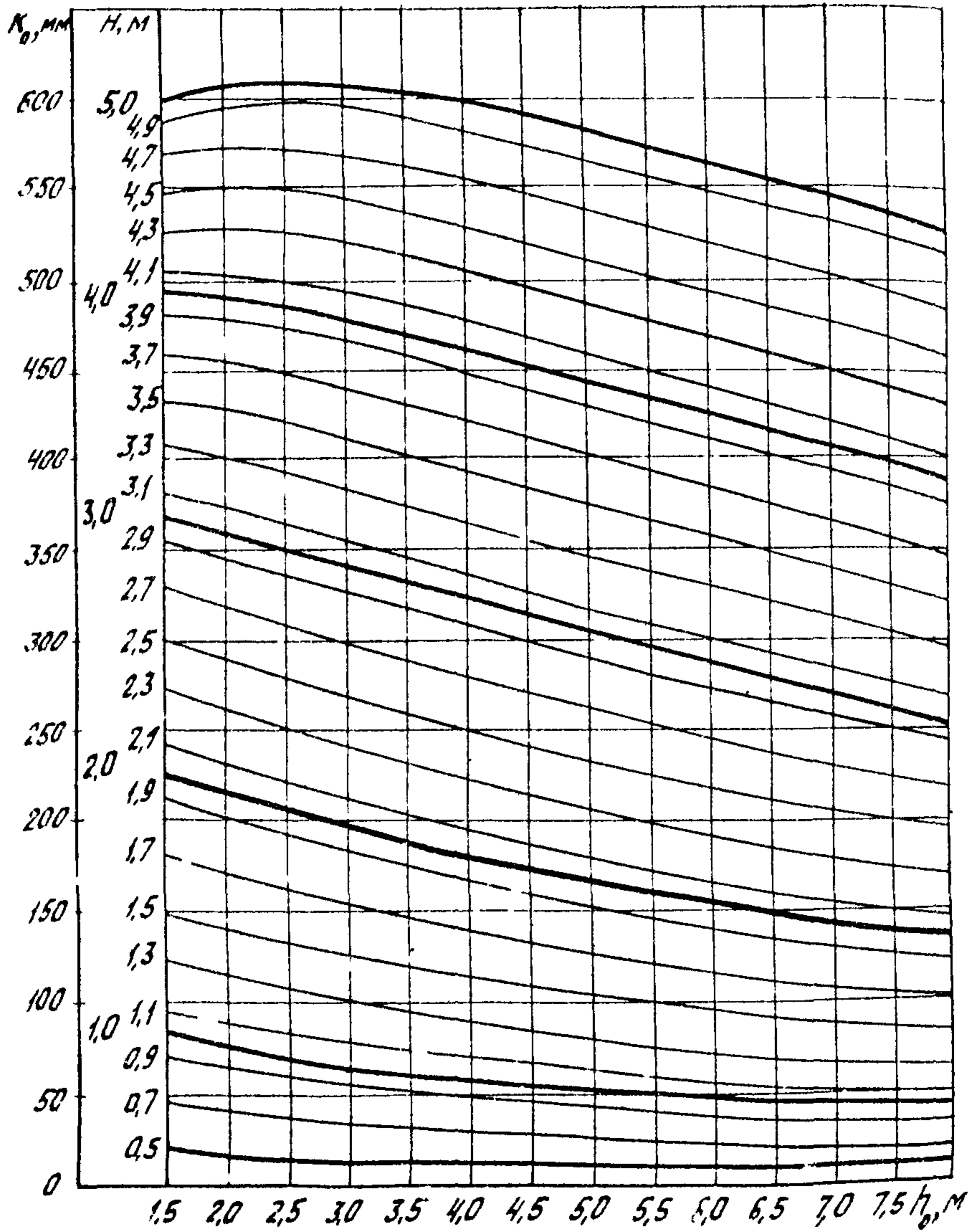


Рис. I. Кривые значений функции K_0

Расстояние от нижней постели шпалы до нижней постели контактного носителя тока, м	Электровагоны													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
	ВЛ19М	ВЛ22М	ВЛ23	ВЛ8	ВЛ10	ВЛ60	ВЛ80	К	Ф	ЧС1 ЧС3	ЧС2	ЧС4	Ф	4-х ос- ВНВ	5-х ос- ВНВ	8-х ос- ВНВ	Пасса- жир- ские	ТЭ-116	ТЭ-3 ТЭ-7	ТЭ-10 ТЭ-10	ТЭ10П ТЭ10П	ТЭ160	ТЭ16	ТЭ102П ТЭ102
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_x .
2. Для определения напряжений σ_x 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) $\text{кг}/\text{см}^2$, определяется в зависимости от плотности скелета торфа $\gamma_{ск}$, $\text{г}/\text{см}^3$, по корреляционной зависимости

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

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

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

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

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

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

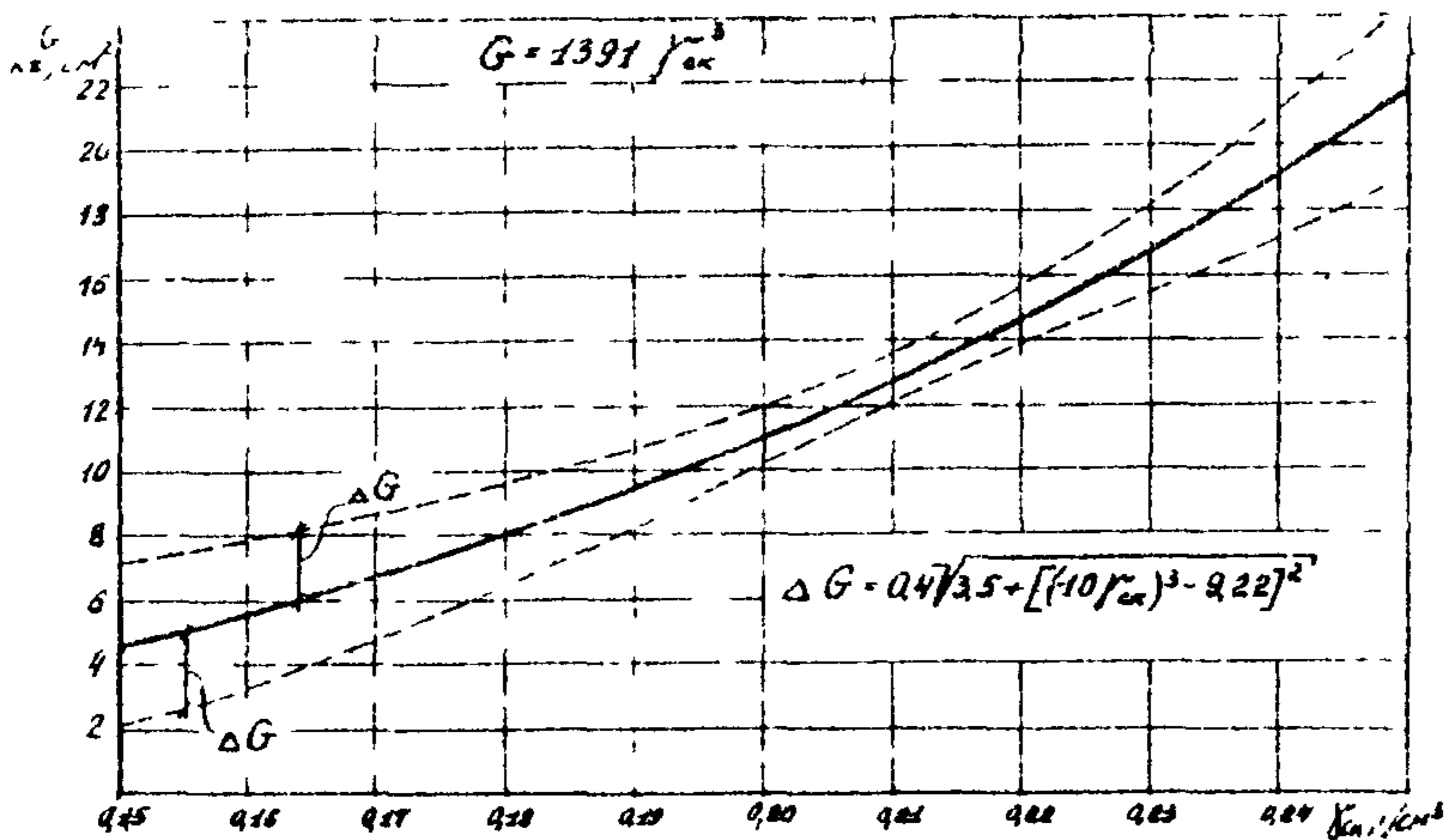


Рис.2. Зависимость модуль сдвига G от плотности торфа $\gamma_{ск}$ в основании насыпи

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

$$h_0 = h_{\delta c} + h_n + H_B + S + S_B, \quad (10)$$

где $h_{\delta c}$ — толщина балластного слоя под шпалой;
 h_n — высота насыпи над поверхностью болота;
 H_B — глубина выторфовывания;
 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

$$H = H_{\delta} - H_B - S - S_B, \quad (11)$$

где H_{δ} — мощность неуплотненного торфа (глубина болота).

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

$$\gamma_{ск} = \gamma_{ск}^0 \frac{H_{\delta} - H_B}{H + S_B}, \quad (12)$$

где $\gamma_{ск}^0$ — 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 $z = h_0$. 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 .

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_n и глубина вырезки торфа H_B 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

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

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

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

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 1. При фиксированной высоте насыпи h_n определяется необходимая глубина выторфовывания H_B .

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

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

4.7. Расчет по варианту 1 рекомендуется выполнять в следующей последовательности.

Задать некоторую начальную глубину выторфовывания H_{B1} .

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

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

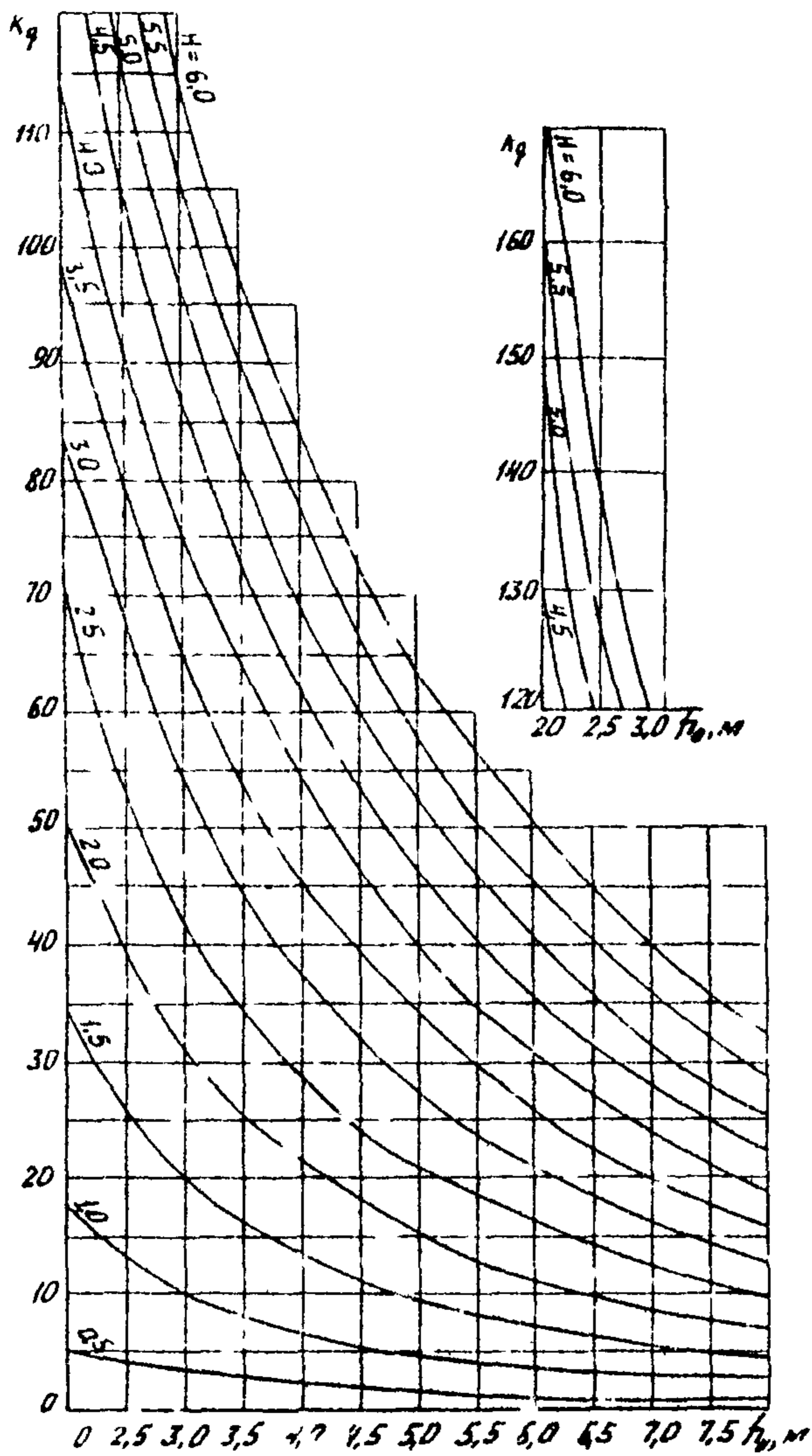


Рис. 5. Кривые изменения функции K_g для четырехосных вагонов

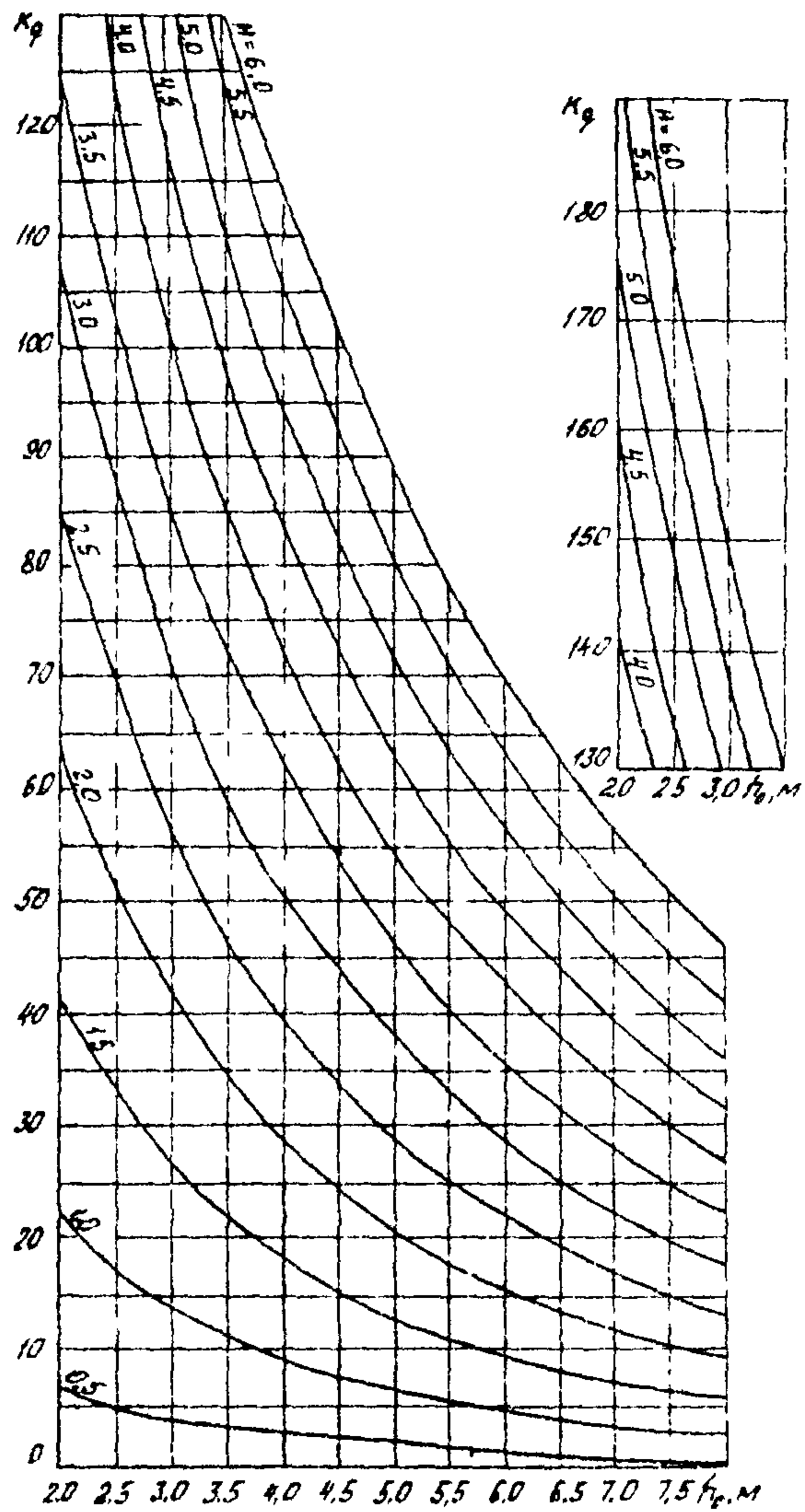


Рис. 4. Кривые изменения функции K_p для шестiosных вагонов

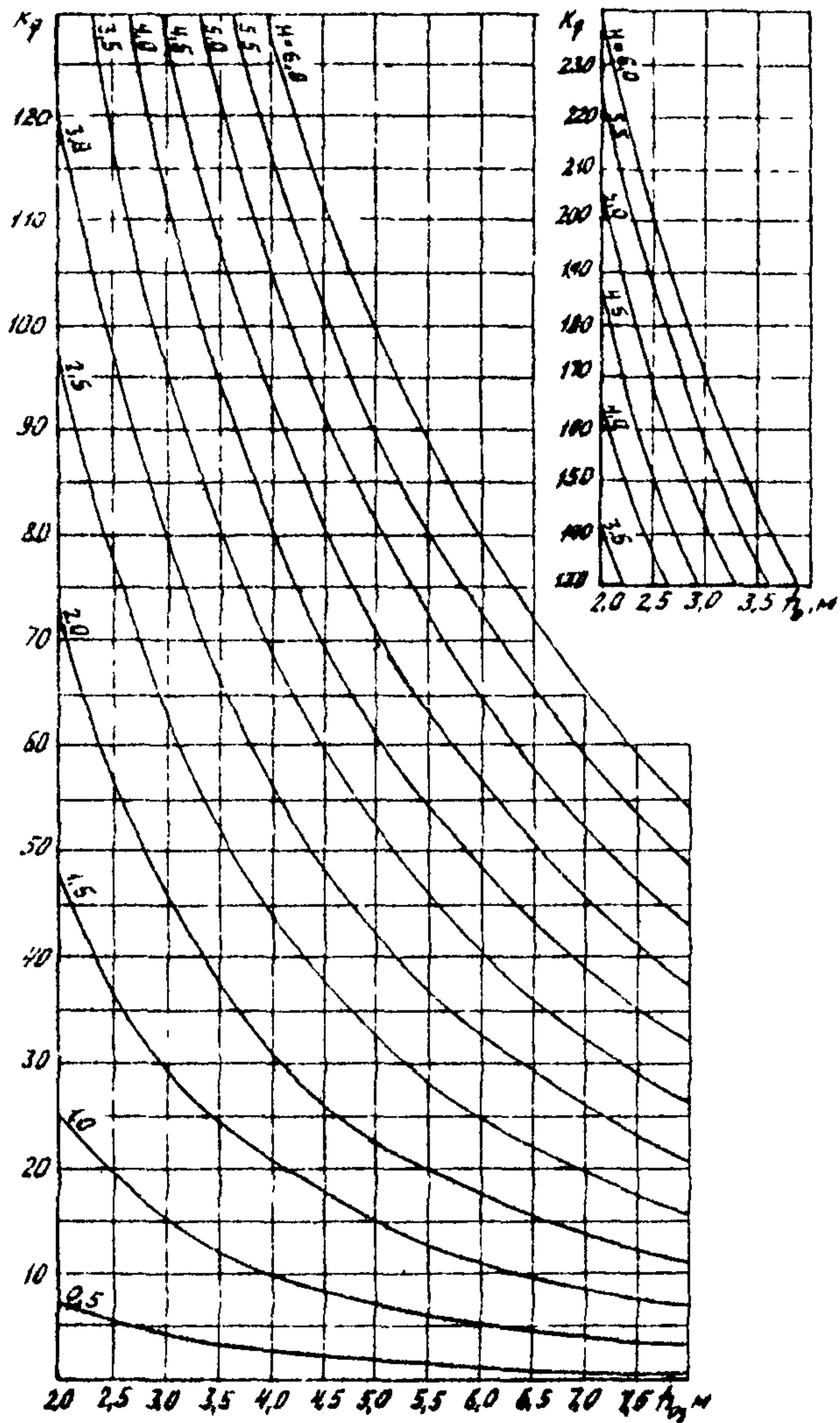


Рис. 5. Кривые изменения функции K_g для восьмиосных вагонов

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

I

К о р н я к С.Г. Расчет необходимой высоты железно-дорожной насыпи из болота и глубины выторфовывания по условию неперевышения под нагрузкой от поездов упругой осадки заданной величины. Госфонд алгоритмов и программ, № П002685. 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 $\sigma_{н1}$, 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 $\Delta\sigma_n$ вследствие досыпки насыпи

$$\Delta\sigma_n = \sigma_{н2} - \sigma_{н1} \quad (15)$$

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

$$\Delta\sigma_n = \sigma_{п1} - \sigma_{п2} \quad (16)$$

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

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_n - \Delta\sigma_n \quad (17)$$

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

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

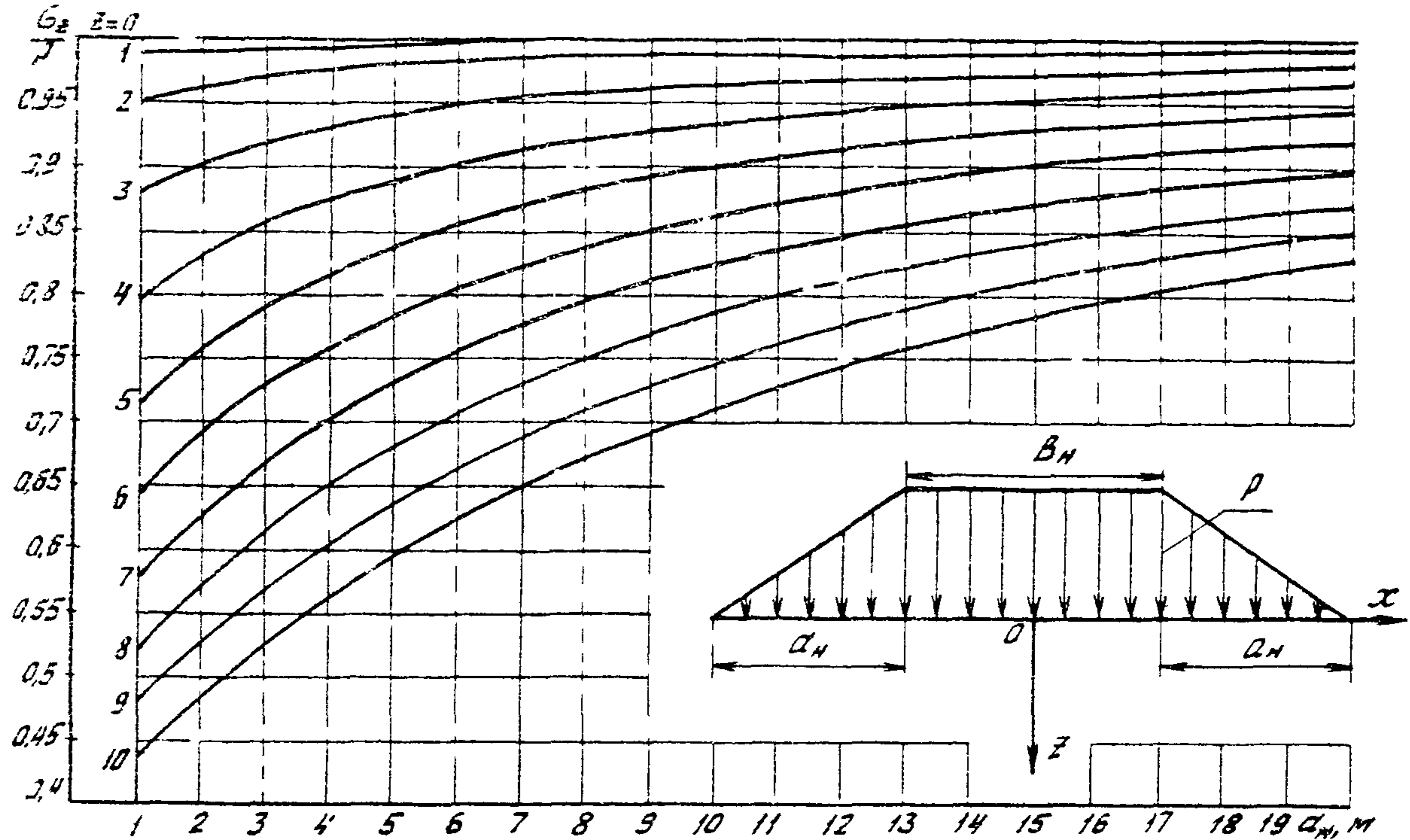


Рис. 6. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений $\frac{G_z}{J}$ в основании насыпи по оси пути при $B_n = 6,5$ м

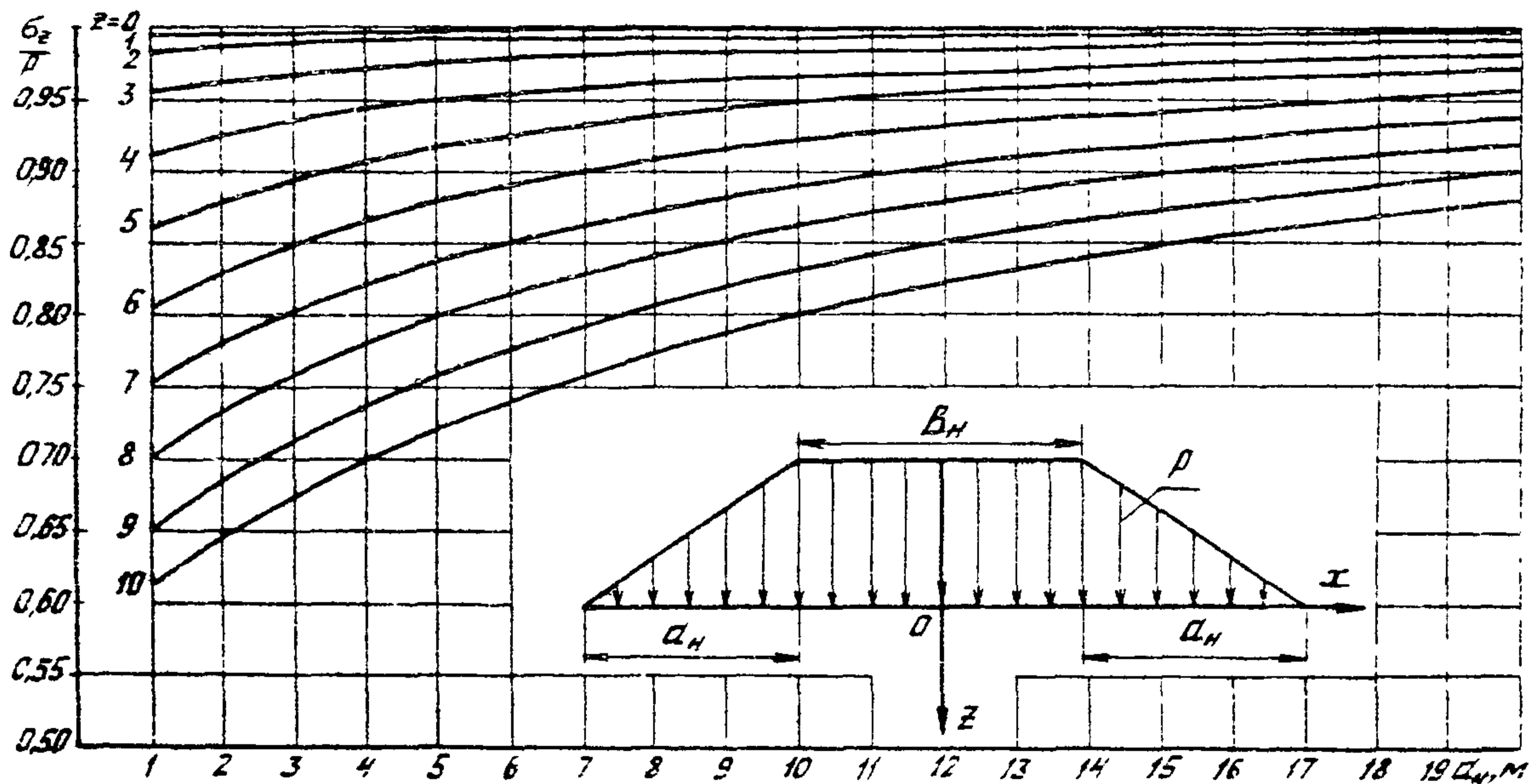


Рис. 7. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений: $\frac{\sigma_z}{\gamma}$
 в основании насыпи при $B_H = 10,6$ м.

для расчета S_g на период свыше двух лет и до шести лет эксплуатации принимать $\sigma_{п2} = 0$, при этом, если по формуле (17) окажется, что $\Delta\sigma \leq 0$, следует принимать $S_g = 0$;

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

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

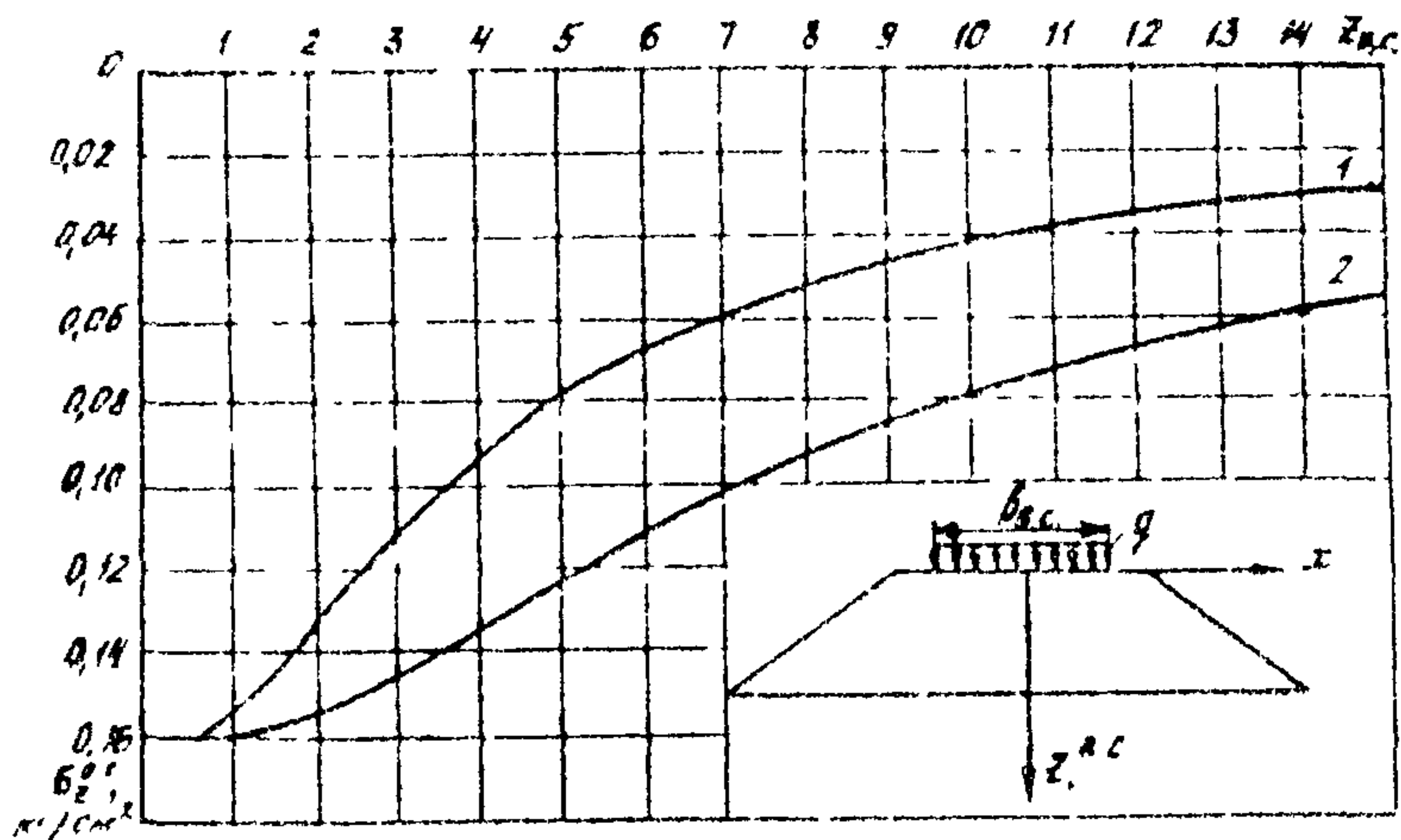


Рис. 8. Кривые значений вертикальных нормальных напряжений σ_z от нагрузки, создаваемой верхним строением пути:

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

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ УПРУГОЙ
ОСАДКИ НАСЫПИ

И с х о д н ы е д а н н ы е

Проектируется насыпь высотой $h_n = 3$ м, шириной по-
верху $B_n = 6,5$ м, с заложением откосов 1:1,5 на болоте
глубиной $H_b = 6$ м без выторфовывания. Толщина балласт-
ного слоя под шпалой $h_{bc} = 0,3$ м.

Уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью боло-
та. Плотность грунта насыпи $\gamma = 1,7$ т/м³. Плотность
грунта насыпи ниже уровня грунтовых вод $\gamma_{взв} = 1$ т/м³.
Деформируемость торфа под нагрузкой характеризуется
компрессионной кривой рис. I.

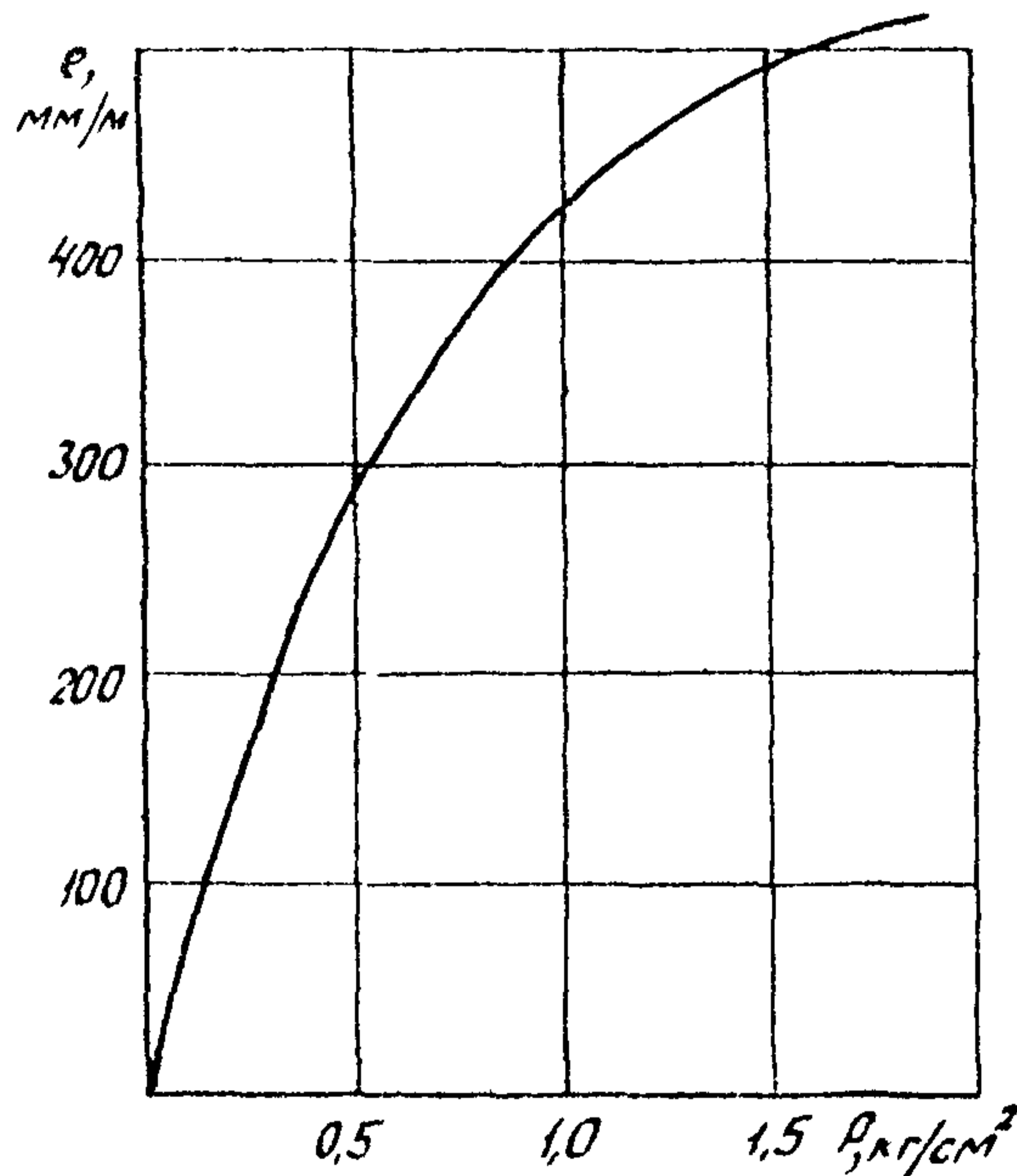


Рис. I. Компрессионная кривая торфа

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.

Р а с ч е т о с т а т о ч н о й о с а д к и
н а с и п и

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

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 $S_{31} = 3 \text{ м}$ (50% от H_S).

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

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

По рис. 8 находим, что на глубине

$$z_{ac} = H_H + S_{31} = 3 + 3 = 6 \text{ м}$$

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

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

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

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 $z = H_8 - S_{31} = 6 - 3 = 3$ м и $a_H = h_H \cdot 1,5 = 4,5$ м находим, что $\frac{\sigma_z}{\rho} = 0,935$.
Тогда $\sigma_z = \frac{\sigma_z}{\rho} \cdot \rho = 0,935 \cdot 0,81 = 0,76$ кг/см².

По рис. 8 находим, что на глубине $z_{bc} = h_H + H_8 = 3 + 6 = 9$ м; $\sigma_{z2}^{bc} = 0,047 \approx 0,05$ кг/см².
Тогда

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

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 $\rho = \sigma_1 = 0,88$ кг/см² $e = 400$ мм/м.

Тогда $S_1 = e \cdot H_8 = 400 \text{ мм/м} \cdot 6 \text{ м} = 2400 \text{ мм} = 2,4$ м

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

При этом условии по рис. I $e = 385$ мм/м, а $S_2 = e \cdot H_8 = 385 \text{ мм/м} \cdot 6 \text{ м} = 2,31$ 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 задаваемая величиной остаточной осадки $S_{32} < S_{p1}$. В частности, примем, что осадка $S_{32} = 1,5$ м (25% от H_8) и повторим расчет.

Аналогично предыдущему, нагрузка на основание от веса насыпи

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

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

$$z_{bc} = h_H + S_{32} = 3 + 1,5 = 4,5 \text{ м}$$

$$\sigma_{z1} = 0,086 \approx 0,09 \text{ кг/см}^2.$$

Давление на основание насыпи

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

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

$$\text{Тогда } \sigma_2 = 0,86 \cdot 0,66 \approx 0,57 \text{ кг/см}^2.$$

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

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

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

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

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

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

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 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.

Р а с ч е т у п р у г о й о с а д к и н а с ы п и

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

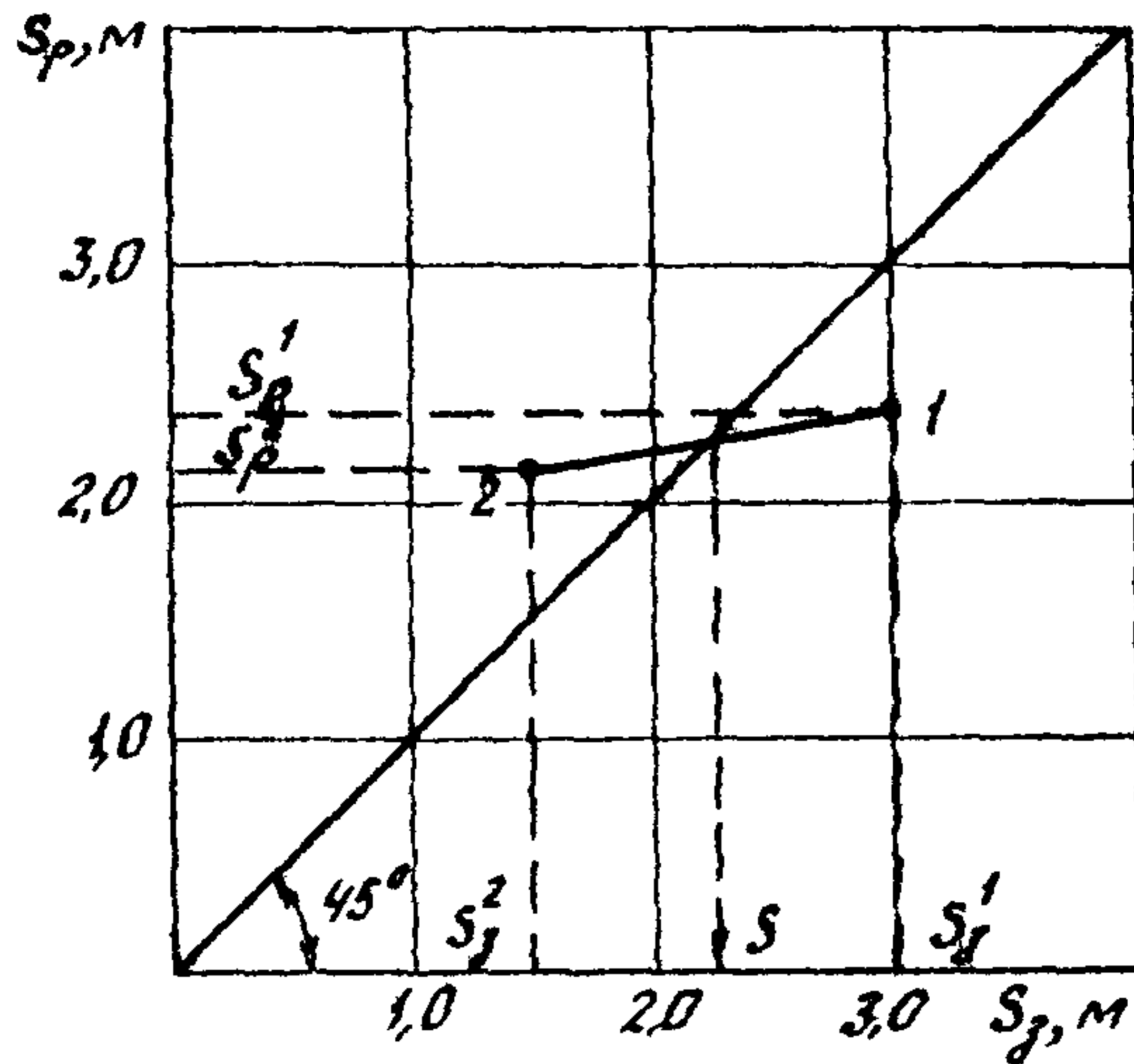


Рис.2. Расчет осадки графо-аналитическим методом

$$h_0 = h_{bc} + h_H + S = 0,3 + 3 + 2,25 = 5,55 \text{ м.}$$

Мощность торфа под насыпью

$$H = H_0 - S = 6 - 2,25 = 3,75 \text{ м.}$$

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

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

По табл. I при $h_0 = 5,55$ м для электровоза ВЛ-60, интерполируя, получим $b_z = q = 0,086 \text{ кг/см}^2$.

По рис. I настоящих Методических рекомендаций при $h_0 = 5,55$ м и $H = 3,75$ м определим значение $K_0 = 400 \text{ мм}$.

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

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

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

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

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 G ,

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

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

ПРИМЕР РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ГЛУБИНЫ ВЫТОРФОВЫВАНИЯ

И с х о д я щ и е д а н н ы е

Проектируется насыпь высотой $h_n = 1,2$ м, шириной поверху $B_n = 6,5$ м, заложением откосов 1:1,5 на болоте глубиной $H_b = 6$ м. Толщина баллотного слоя под шпалой $h_{bc} = 0,3$ м. Уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью болота. Плотность грунта насыпи $\gamma = 1,7$ т/м³. Плотность грунта насыпи ниже уровня грунтовых вод $\gamma_{вв} = 1$ т/м³. Деформируемость торфа под нагрузкой характеризуется компрессионной кривой рис. 1 приложения 1. Плотность скелета торфа в природном залегании $\gamma_{ск}^0 = 0,13$ г/см³.

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.

Р а с ч е т в е л и ч и н ы у п р у г о й
о с а д к и п р и у л о ж е н и и в о з в е -
д е н и я н а с ы п и б е з в ы т о р ф о -
в ы в а н и я $H_{01} = 0$

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 олоя

$$h_{01} = h_{bc} + h_n + S_1 = 0,3 + 1,2 + 1,5 = 3 \text{ м.}$$

Мощность олоя торфа под насыпью

$$H_1 = H_b - S_1 = 6 - 1,5 = 4,5 \text{ м.}$$

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

$$\gamma_{ск} = \gamma_{ск}^0 \cdot \frac{H_b}{H_1} = 0,13 \cdot \frac{6}{4,5} = 0,173 \text{ г/см}^3.$$

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

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

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 $\lambda_1 > [\lambda]$ и для соблюдения требования $\lambda \leq [\lambda]$ необходимо выполнить (в соответствии с условием задачи) выторфовывание.

Р а с ч е т в е л и ч и н ы о с а д к и
 $\lambda = \lambda_2$ при условии возведе-
 ния насыпи с выторфовыва-
 нием $H_{B2} = 1,5$ м

Определим величину остаточной осадки насыпи S_2 . Будем считать, что поперечное сечение траншеи выторфовывания трапециoidalное. 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_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 P будет

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

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

основного текста Методических рекомендаций

$$\sigma_z^{BC} = 0,092 \text{ кг/см}^2.$$

Таким образом, напряжение σ_1 на контакте насыпь-торф

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

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

По рис.6 при $Z = H_5 - H_6 - S_2 = 6 - 1,5 - 1,35 = 3,15 \text{ м}$ и

$$a_H = \frac{h_H}{h_H} \cdot 1,5 = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \text{ м}$$

находим, что

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

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

По рис.8 находим, что на глубине

$$z_{BC} = h_H + H_5 = 1,2 + 6 = 7,2 \text{ м};$$

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

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

По рис.1 приложения I при $\rho = \sigma_1 = 0,58 \text{ кг/см}^2$;
 $e = 320 \text{ мм/м}$, тогда $S_2' = e(H_5 - H_{62}) = 320 \cdot (6 - 1,5) = 1440 \text{ мм} = 144 \text{ см}$. 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_2 .

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

$$h_{02} = h_{6c} + h_H + H_{62} + S_2 = 0,3 + 1,2 + 1,5 + 1,37 = 4,37 \text{ м};$$

$$H_2 = H_5 + H_{62} - S_2 = 6 - 1,5 - 1,37 = 3,13 \text{ м};$$

$$\lambda_{сх} = \lambda_{сх}^0 \cdot \frac{H_5 - H_{62}}{H_2} = 0,13 \cdot \frac{4,5}{3,13} = 0,187 \text{ г/см}^3.$$

По рис.5 при $h_0 = h_{02} = 4,37 \text{ м}$ и $H = H_2 = 3,13 \text{ м}$

$$K_0 = 52 \text{ мм} \cdot \text{кг/см}^2.$$

$$\sigma_2 = 1,39 (1,87)^3 = 1,39 \cdot 6,54 = 9,09 \text{ кг/см}^2;$$

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{G_2} = \frac{52}{9,09} = 5,7 \text{ мм.}$$

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

Р а с ч е т в е л и ч и н ы у п р у г о й
о с а д к и п р и у с л о в и и в о з в е д е н и я
н а о с ы п и о в ы т о р ф о в ы в а н и е м
 $H_{B3} = 3$ м

Величина остаточной осадки S_3 , определенная расчетом аналогичным предыдущему, оказалась равной 103 см.

Упругая осадка насыпи

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

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

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

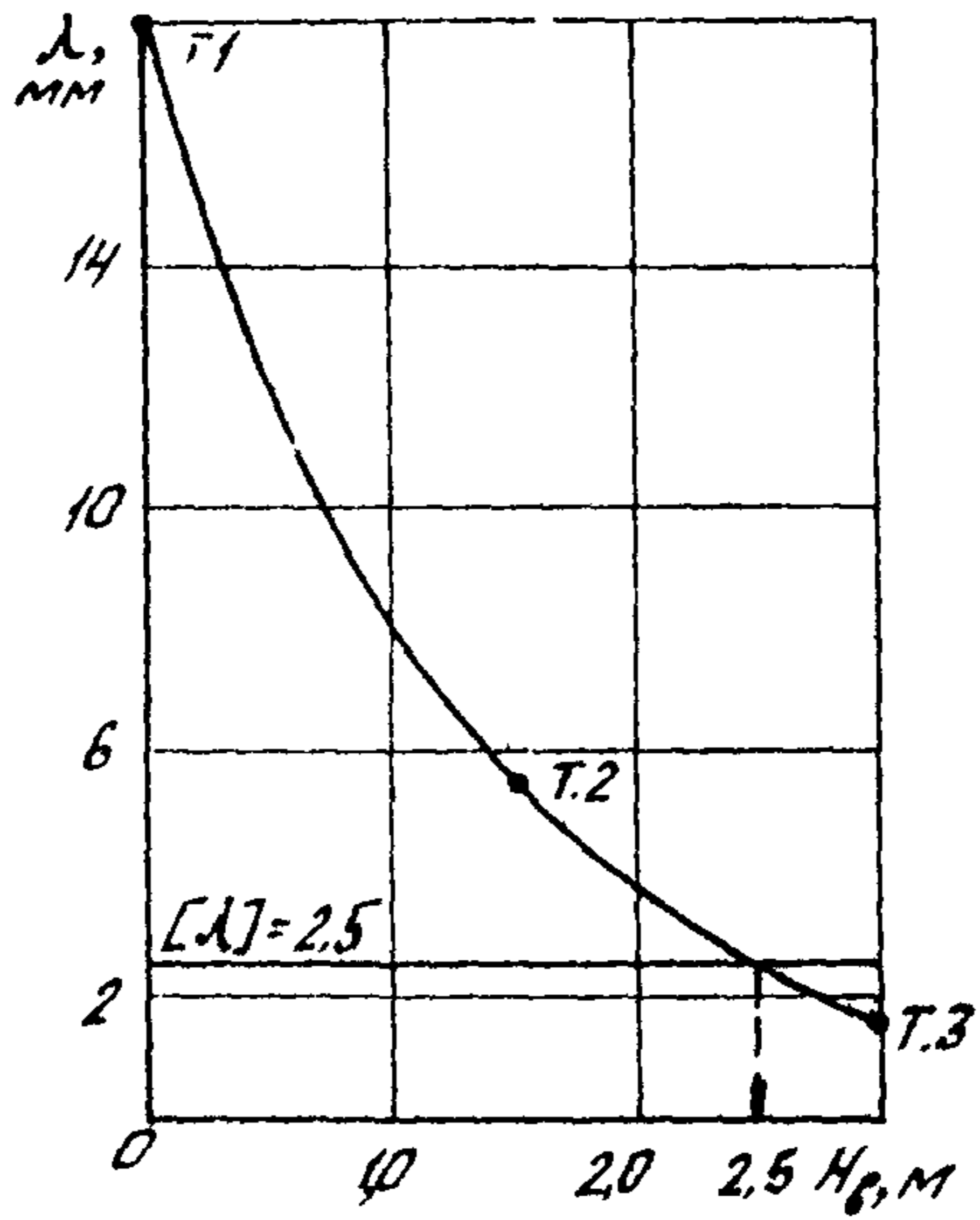
По рис. I приложения I при $h_0 = h_{03} = 5,53$ м
и $H = H_3 = 1,97$ м $\lambda_y = 19 \text{ мм} \cdot \text{кг/см}^2$;

$$G_3 = 1,39 \cdot (1,98)^3 = 10,8 \text{ кг/см}^2$$

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

На рисунке наносим точки 1, 2, 3 с координатами (H_{B1}, λ_1) , (H_{B2}, λ_2) и (H_{B3}, λ_3) .

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



Зависимость упругой осадки λ от
 глубины выторфовывания H_b от

ПРИМЕР РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ВЫСОТЫ НАСЫПИ

И с х о д н ы е д а н н ы е

Насыпь возводится без выторфовывания. Расчетная нагрузка — тепловоз ТЭ-116. 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.

Р а с ч е т в е л и ч и н ы у п р у г о й
о с а д к и λ п р и в ы с о т е н а с ы п и
 $h_H = h_{H1} = 3$ м

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

Упругая осадка λ_1 этой насыпи

$$h_{o1} = h_{bc} + h_{H1} + S_1 = 0,3 + 3 + 2,25 = 5,55 \text{ м};$$

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

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

$$G_1 = 1,39 \cdot (10 \gamma_{ск1})^3 = 1,39 \cdot 9 = 12,5 \text{ кг/см}^2.$$

По таблице для тепловоза ТЭ-116 при $z = h_o = h_{o1} = 5,55$ м интерполируя, находим $q = q_1 = 0,098 \text{ кг/см}^2$.

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.

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

Следовательно, принятая высота насыпи недостаточна.

Примем высоту насыпи $h_H = h_{H2} = 3,7$ м.

Р а с ч е т у п р у г о й о с а д к и
н а с ы п и λ п р и у с л о в и и

$$h_{H2} = 3,7 \text{ м}$$

В результате расчета остаточной осадки получ

$$S_2 = 2,44 \text{ м.}$$

Упругая осадка λ_2 насыпи

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

$$H_2 = 6 - 2,44 = 3,56 \text{ м};$$

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

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

$$q_2 = 0,081 \text{ кг/см}^2;$$

$$K_{02} = 350 \text{ мм};$$

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

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 насыпи h_H , при которой упругая осадка $\lambda = [\lambda] = 2,5$ мм, приближенно определяем с помощью линейной интерполяции.

Интерполяция может быть выполнена графически или аналитически:

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

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

$$h_H = h_{H1} + \frac{\Delta h_H}{\Delta\lambda} (\lambda_1 - [\lambda]) = 3 \text{ м} + \frac{0,7}{1,2} (3,14 - 2,5) = 3,4 \text{ м}.$$

Таким образом, требуемая высота насыпи 3,4 м.

Приложение 4
ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ДОСЫПКИ НАСЫПИ

И с х о д н ы е д а н н ы е

Насыпь на болоте имеет высоту $h_г = 0,7$ м. Часть насыпи ниже поверхности болота составляет $\delta = 1,5$ м. Толщина слоя балласта $h_{гс} = 0,3$ м. Ширина основной площадки $B_H = 7$ м. Заложение откосов 1:1,5. Грунт тела насыпи выше уровня грунтовых вод имеет плотность $\gamma_H^* = 1,7$ т/м³, ниже $\gamma_{взв}^* = 1$ т/м³. 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

$$\gamma_g^* = 1,7 \text{ т/м}^3.$$

О п р е д е л е н и е в е л и ч и н ы 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 ы п и д о в е д о с ы п к и п о д н а в р -
у в к о й о т в о с ь м и о с н ы х
в а г о н о в

Толщина насыпи

$$h_0 = h_H + \delta + h_{гс} = 0,7 + 1,5 + 0,3 = 2,5 \text{ м.}$$

По рис. I основного текста Методических рекомендаций находим, что при $h_0 = 2,5$ м и $H = 2$ м значение $K_0 = 205$ мм. Величина $\sigma_2 = q$ для тепловоза ТЭ-3 при $z = h_0 = 2,5$ м по таблице составляет $0,21$ кг/см². Соответствующее значение σ_2 для восьмиосных вагонов

с осевой нагрузкой 21 т по той же таблице составляет 0,278 кг/см². 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/см². 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.

О п р е д е л е н и е в е л и ч и н ы д о п о л -
н и т е л ь н о й о с т а т о ч н о й о с а д к
н а с ы п и S_p

Нагрузка на основание P_1 от веса насыпи до ее до-
сыпки

$$P_1 = \gamma_H \cdot h_H + \gamma_{2,5} \delta = 1,7 \cdot 0,7 + 1 \cdot 1,5 = 2,69 \text{ т/м}^2 \approx 0,27 \text{ кг/см}^2. \text{ По рис. 8 напряжение } \sigma_z^{bc} \text{ от веса верхнего строения на глубине } z_{bc} = h_H + \delta = 0,7 + 1,5 = 2,2 \text{ м равно } 0,13 \text{ кг/см}^2.$$

Таким образом, напряжение σ_{H1}' от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на уровне поверхности контакта насыпь-торф будет

$$\sigma_{H1}' = P_1 + \sigma_z^{bc} = 0,27 + 0,13 = 0,4 \text{ кг/см}^2.$$

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

В относительных единицах получим $\frac{\sigma_z}{P_1} = 0,95$. Тогда $\sigma_z = \frac{\sigma_z}{P_1} \cdot P_1 = 0,95 \cdot 0,27 = 0,256 \text{ кг/см}^2$. На глубина $z_{bc} = h_H + \delta + H = 0,7 + 1,5 + 2 = 4,2$ м

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

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

$$\sigma_{н1}'' = \sigma_2 + \sigma_2^{вс} = 0,256 + 0,09 \approx 0,35 \text{ кг/см}^2.$$

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

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

Для расчета напряжений от поезда $\sigma_{п1}$ 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

$\sigma_2 = \sigma_{п1}' = 0,192 \text{ кг/см}^2$, а на глубине $z = h_0 + H = 2,5 + 2 = 4,5 \text{ м}$ (т.е. на уровне нижней границы слоя торфа)

$$\sigma_2 = \sigma_{п1}'' = 0,102 \text{ кг/см}^2.$$

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 ρ_2 на $h_2 = 1,5 \text{ м}$.

Нагрузка на основание от веса насыпи увеличится на

$$\Delta \rho = \gamma_2 \cdot h_2 = 1,7 \cdot 1,5 = 2,55 = 0,255 \text{ кг/см}^2$$

и оставит $\rho_2 = \rho_1 + \Delta \rho = 0,27 + 0,255 = 0,525 \text{ кг/см}^2$.

Напряжение $\sigma_2^{вс}$ от веса верхнего строения на глубине

$$z_{вс} = h_n + h_2 + \delta = 0,7 + 1,5 + 1,5 = 3,7$$

по рис. 8 равно $0,1 \text{ кг/см}^2$.

Таким образом, напряжение σ'_{H2} от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на поверхности основания

$$\sigma'_{H2} = P_2 + \sigma_z^{вс} = 0,525 + 0,1 \approx 0,62 \text{ кг/см}^2.$$

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 $a_H = (h_H + h_g) \cdot 1,5 = (0,7 + 1,5) \cdot 1,5 = 3,3$ м в относительных единицах получим

$$\text{Тогда } \sigma_z = \frac{\sigma_z}{P_2} \cdot P_2 = 0,97 \cdot 0,525 \approx 0,51 \text{ кг/см}^2.$$

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

Таким образом, напряжение σ''_{H2} от веса насыпи с учетом нагрузки от верхнего строения на уровне нижней границы слоя торфа

$$\sigma''_{H2} = 0,51 + 0,07 \approx 0,58 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее значение напряжения σ_{H2} от постоянной нагрузки в основании насыпи после ее досыпки будет

$$\sigma_{H2} = \frac{\sigma'_{H2} + \sigma''_{H2}}{2} = \frac{0,62 + 0,58}{2} = 0,6 \text{ кг/см}^2.$$

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

Тогда на глубине $z = h_0 + h_g = 2,5 + 1,5 = 4$ м (на поверхности основания) по таблице для четырехосных вагонов находим $\sigma_z = \sigma'_{п2} = 0,116 \text{ кг/см}^2$, а на уровне нижней границы слоя торфа при $z = h_0 + h_g + H = 2,5 + 1,5 + 2 = 6$ м. По таблице $\sigma_z = \sigma''_{п2} = 0,072 \text{ кг/см}^2$.

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.

$$\sigma_{л2} = \frac{\sigma'_{л2} + \sigma''_{л2}}{2} = \frac{0,116 + 0,072}{2} = 0,094 \text{ кг/см}^2.$$

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

От временной нагрузки напряжения уменьшились на $\Delta\sigma_n = 0,147 - 0,094 \approx 0,05 \text{ кг/см}^2$ (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 σ_2^{cp} в основании насыпи после ее досыпки от постоянной и временной нагрузок будет $\sigma_2^{cp} = \sigma_1^{cp} + \Delta\sigma = 0,52 + 0,18 = 0,7 \text{ кг/см}^2$.

По рис. I приложения I найдем, что под нагрузкой $\sigma_1^{cp} = 0,52 \text{ кг/см}^2$ (до досыпки насыпи) модуль осадки $e_1 = 300 \text{ мм/м}$, а под нагрузкой $\sigma_2^{cp} = 0,7 \text{ кг/см}^2$ модуль осадки $e_2 = 360 \text{ мм/м}$, т.е. увеличению нагрузки на основании на $\Delta\sigma = 0,18 \text{ кг/см}^2$ 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

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

**Р а с ч е т у п р у г о й н а с ы п и
п о с л е е е д о с ы п к и**

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

Толщина насыпи после ее досыпки

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

Из формул (7) 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 $h_0 = h_{ок} = 4,12$ м и $H_k = 1,88$ м $K_0 = K_{ок} = 165$ мм. При $z = h_{ок} = 412$ м по таблице для восьмиосных вагонов (осевая нагрузка 21 т), интерполируя, получим $\sigma_z = 0,172$ кг/см². Для расчетных восьмиосных вагонов с осевой нагрузкой 25 т σ_z будет в 25/21 раз больше, т.е.

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

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

$$\lambda_k = \lambda_p \frac{q_k \cdot K_{ок} \cdot G}{q \cdot K_0 \cdot G_k}.$$

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 достаточна, чтобы исключить под воздействием восьмиосных вагонов с осевой нагрузкой 25 т упругие осадки более $[\lambda] = 2$ мм. Если расчет выполняется в предположении, что $S_g = 0$, то $G_k = G$ и формула для определения λ_k будет иметь следующий вид

$$\lambda_k = \lambda_p \frac{q_k \cdot K_{ок}}{q \cdot K_0}$$

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

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

выше $[\lambda] = 2$ мм.