Московский
государственный университет
путей сообщения
(МИИТ)

РЕКОМЕНДАЦИИ

по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях

ТИМР
Москва 2005

gost.e-ecolog.ru

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

Утверждены
проректором
по научной работе МИИТа
профессором Кругловым В.М.

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СЛАБЫХ ОСНОВАНИЯХ

МОСКВА 2005

УДК 625.1.002

Рекомендации по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях / Под общ. редакцией С.Я. Луцкого - М.: Информационно-издательский центр "Тимр", 2005. с. 96

Изложены методика, примеры расчётов и опыт применения интенсивной технологии при строительстве земляных сооружений в сложных природных условиях на основе применения регулированных вибрационных режимов уплотнения и мониторинга состояния грунтов. Методика технологических расчётов включает в себя: определение деформационных и прочностных характеристик грунтов основания при послойной отсыпке насыпи.

Разработаны предложения по обеспечению устойчивости слабого основания за счёт устройства дренажа и применения геосинтетических материалов.

Предназначены строительным организациям, научным и проектным институтам для решения технологических проблем строительства объектов транспорта в сложных инженерно-геологических условиях. Они полезны также для подготовки и повышения квалификации инженеров строительных специальностей.

Рекомендации разработали д-р техн. наук, проф. С.Я. Луцкий (п. 1 - 11, 13); проф. Э.С. Спиридонов (п. 1, 2, 11); д-р транспорта РАТ В.И. Сбитнев (п. 1, 11); инженер Д.В. Долгов (п. 2 - 7, 9, 10, 12) и канд. техн. наук А.В. Пономарёв (п. 1 3, 8). Общая редакция д-ра техн. наук, проф. С.Я. Луцкого.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А.А. Цернант (АО "ЦНИИС"); д-р экон. наук, проф. А.П. Гончарук (ДвГУПС); проектно-изыскательский институт "Проекттрансстрой".

Ил. 50, табл. 43, библиограф. 12 назв.

Т 52(03) - 2005

ISB N 5-87010-169-7

© Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)
© Информационно-издательский центр "ТИМР", 2005

ВВЕДЕНИЕ

Рекомендации по проектированию и строительству земляных сооружений на слабых основаниях в режиме интенсивной технологии разработаны Московским государственным университетом путей сообщения (МИИТ) на основе действующих строительных норм и правил по выбору конструктивных решений, проектированию и строительству земляных сооружений и оснований в сложных природных условиях, а также результатов исследований, экспериментов и практического опыта по данной проблеме.

К слабым отнесены грунты, не обладающие достаточной несущей способностью, при использовании их в качестве оснований насыпей необходимо учитывать возможность деформаций под воздействием нагрузки от веса насыпи и работающих на насыпи машин.

Насыпь на слабом основании следует рассматривать как сложную конструкцию, в которой под нагрузкой взаимодействуют элементы основания (слои грунтов, дренажные и водоотводные сооружения, геосинтетический материал); насыпи (грунтовый массив, армированный ГСМ) и дополнительные удерживающие сооружения.

Эффективное взаимодействие всех элементов насыпи может быть достигнуто в результате принятия оптимальной конструкции и рациональной технологии, в том числе и при применении интенсивной технологии её возведения. Интенсивные технологические режимы обеспечивают ускорение осадки и повышение прочности грунтов за счёт пошагового регулирования параметров строительной нагрузки и мониторинга состояния насыпи и основания.

При составлении рекомендаций учтёны результаты научных, проектных и производственных организаций транспортного строительства при строительстве железных и автомобильных дорог в сложных природных условиях.

Экспериментальное применение выполнено совместно с ОАО "Уралгипротранс". Результаты экспериментального применения одобрены Дорожным комитетом Пермской области.

Рекомендации предназначены научным и проектным институтам для решения технологических проблем строительства объектов транспорта в сложных инженерно-геологических условиях. Они полезны также для подготовки и повышения квалификации инженеров строительных специальностей.

Методика проектирования интенсивной технологии изложена на примерах сооружения земляного полотна:

Пример 1. Сооружение земляного полотна при строительстве железнодорожной линии Карпогоры - Вендинга.

Пример 2. Строительство автодорожного земляного полотна на подходах к мостовому переходу через р. Каму.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ

Рекомендации предназначены для проектирования и строительства земляных сооружений на слабых основаниях.

Методика расчета и выбора оптимальных интенсивных технологических режимов изложена на примере возведения насыпей. В её основу положен учёт влияния управляемых строительных (технических и технологических) параметров при расчетах оснований по допустимым деформациям и предельному состоянию.

Анализ структуры и свойств слабых оснований приводит к выводу о целесообразности управления технологическими процессами при отсыпке насыпи с контролем изменения грунтовых характеристик. Для этой цели к внешней нагрузке на основание от насыпи следует добавить строительную нагрузку от грунтоуплотняющей техники и принять в качестве управляемых технологические параметры. Такой вывод имеет практическую значимость, так как режимы работы виброкатков могут изменяться в широком диапазоне.

В ходе земляных работ в сложных инженерных условиях меняются физические свойства грунтов. Эти изменения зависят не только от принятых конструктивно-технических решений, но и от технологических процессов. Повышение качества земляных сооружений можно достичь как путём проектирования, так и управления технологическими процессами при строительстве.

Возможность использования слабой толщи в качестве основания устанавливается по степени ее устойчивости, характеризуемой коэффициентом безопасности $K_{без}$, для определения которого необходимо провести расчет осадки и устойчивости.

В зависимости от $K_{без}$, определяемого для условий быстрой и медленной отсыпки, основание (в целом) относят к одному из типов в соответствии с табл.1.1.

В дополнение к существующей методике индивидуального проектирования при интенсивной технологии следует учитывать особенности испытаний слабых грунтов для определения пока-

зателей их механических свойств. Исходные данные для расчёта интенсивных технологических режимов:

а) проектные характеристики насыпи и основания (высота, ширина, заложение откосов);

б) результаты инженерно-геологических изысканий территории строительства;

Таблица 1.1

Типы слабых оснований

Тип основания	Определяющий признак	Характеристика устойчивости	Преобладающие деформации грунта наиболее опасного слоя	Возможность использования слабой толщи в качестве основания
I	$K_{без}^{нач} \geq 1$	Устойчивость обеспечена при любой скорости отсыпки насыпи	Сжатие	Можно использовать в качестве основания
IIA	$K_{без}^{нач} < 1 \leq K_{без}^{кон}$	Устойчивость при быстрой отсыпке не обеспечена, но достигается при медленной отсыпке	При быстрой отсыпке - сдвиг (выпор); при медленной - сжатие	Можно использовать в качестве основания при медленной отсыпке
IIБ	$0{,}2 \leq K_{без}^{кон} < 1$	Для окончательного суждения о степени устойчивости необходимы лабораторные испытания	———	———
III	$K_{без}^{кон} < 0{,}2$	Устойчивость не может быть обеспечена ни при какой степени консолидации	———	———

в) параметры грунтоуплотняющей техники;

г) сроки строительства.

Для ускорения фильтрационной консолидации водонасыщенных грунтов основания в подготовительный период следует предусмотреть устройство дренажных прорезей и водоотводных канав (рис. 1.1), засыпанных песчано-гравийной смесью (ПГС).

При значительной (расчётной) глубине слабого основания в дополнение к дренажным прорезям предусматривается устройство песчаных свай при погружении инвентарных труб с применением виброустановок, например виброоборудование LRB 125 - LRB 255 фирмы Либхерр; технология их устройства изложена в п.п. 9 - 11.

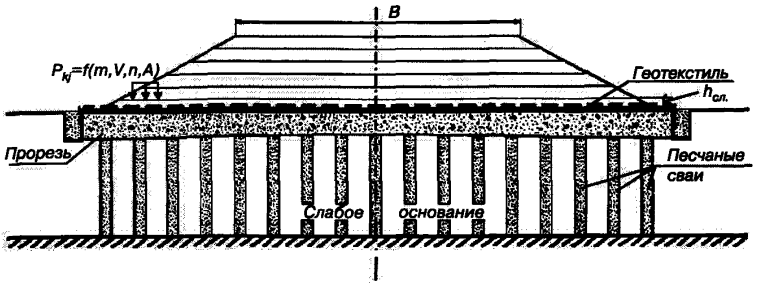


Рис. 1.1

2. ПАРАМЕТРЫ ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Проектирование интенсивной технологии состоит в выборе таких технологических параметров, которые в совокупности обеспечат улучшение эксплуатационных характеристик земляных сооружений:

- уменьшение осадки (S);
- повышение модуля деформации (E);
- повышение прочностных характеристик грунта.

Параметры интенсивной технологии при строительстве земляных сооружений на слабых основаниях приведены в табл.2.1.

На основании данных табл. 2.1. дополнительно в лабораторных условиях определяются характеристики:

1) для грунтов насыпи:

- максимальная плотность ρ_d, г/см^3;
- оптимальная влажность $W_{опт}$, %.

2) для грунтов основания:

- влажность на границе текучести $W_т$, %;
- влажность на границе раскатывания W_p, %;
- число пластичности J_p, %.

При помощи этих величин определяется показатель текучести (показатель консистенции) для оценки деформативности основания [9].

Показатель текучести J_L минеральных и органоминеральных грунтов рассчитывается по формуле:

$$J_L = \frac{W_{пр} - W_p}{J_p}. \qquad (1)$$

Таблица 2.1

Параметры интенсивной технологии

Группа параметров		Наименование параметров	Обозначение параметров
Технологические и конструктивные	Грунт насыпи	Давление от веса грунта насыпи;	$P_т$
		плотность грунта;	$\gamma_н$
		высота насыпи;	H
		число слоев отсыпки;	$n_с$
		толщина слоя отсыпки;	$h_с$
		крутизна откосов	$m_с$
	Каток	Давление от катка;	$P_к$
		амплитуда вибрации;	A
		частота вибрации;	ν
		вынуждающая сила;	F
		скорость движения;	V
		количество проходов;	$N_н$
		время между проходами	$T_{ож}$
Характеристики грунтов основания и замены (вырезки)		Плотность грунта;	$\gamma_{ср}$
		природная влажность;	$W_{пр}$
		показатель консистенции грунта;	J_I
		модуль деформации;	E
		модуль осадки;	ε
		сцепление;	C
		угол внутреннего трения;	φ
		коэффициент фильтрации;	$K_ф$
		коэффициент пористости;	e
		толщина замененного грунта	$h_{зам}$
Характеристики геосинтетического материала (геотекстиль, георешетки и геосетки)		Толщина материала;	δ
		поверхностная плотность;	$\gamma_{ср}$
		предел на растяжение;	$R_р$
		наибольшее удлинение;	ε_0
		модуль упругости;	$E_{см}$
		водопроницаемость;	$K_ф^{см}$
		прочность на продавливание;	$R_{пр}$
		эффективный диаметр отверстий;	$O_{90,w}$
		долговременная прочность	$R_{пв}$

По величине J_L устанавливается консистенция грунта (табл.2.2).

Таблица 2.2

Значения показателя текучести для различной консистенции грунта

Консистенция грунта	Показатель текучести J_L
Твердая, полутвердая	0 – 0,25
Тугопластичная	0,25 – 0,50
Мягкопластичная	0,50 – 0,75
Текучепластичная	0,75 – 1,00
Текучая	> 1,00

3. РАСЧЕТ ОСАДКИ СЛАБОЙ ТОЛЩИ ОСНОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

3.1 Методика расчетов

Расчёт осадок производится по формулам:

$$S_{\Gamma ij} = \frac{(h_{\Pi} - S_{i(j-1)})\gamma(h_{Hi} + S_{i(j-1)})\left(2R_i + R_2 + \frac{2b_j}{a_j}R_1\right)}{\pi E_i}, \qquad (2)$$

$$S_{Kij} = \frac{(h_{\Pi} - S_{i(j-1)})P_K\left(2R_i + R_2 + \frac{2b_j}{a_j}R_1\right)}{\pi E_i}, \qquad (3)$$

$$S_{ij} = S_{\Gamma ij} + S_{Kij}, \qquad (4)$$

$$S_{общ} = S_{\Gamma ij} + \Sigma S_{Kij}. \qquad (5)$$

где $S_{\Gamma ij}$ - осадка i-го слоя основания от веса грунта после отсыпки j-го слоя насыпи, м;

S_{Kij} - осадка i-го слоя основания от катка после отсыпки j-го слоя насыпи, м;

S_{ij} - общая осадка от грунта и катка после отсыпки предыдущих слоёв, м;

a_j - проекция откоса j-го слоя насыпи, м;

b_j - половина ширины j-го слоя насыпи, м;

h_{Hi} - высота отсыпанной насыпи, м;

h_{Π} - мощность сжимаемого слоя, м;

γ - плотность грунта насыпи, т/м^3;

E_i - модуль деформации i-го слоя грунта основания, т/м^2;
Z_i - расстояние от поверхности грунта до середины i-го слоя основания, м;
P_K - давление от катка, т/м^2;
R_1 и R_2 - параметрические размеры насыпи [2].

$$R_1 = arctg \frac{a_j + b_j}{Z_i} - arctg \frac{b_j}{Z_i}, \quad (6)$$

$$R_2 = arctg \frac{b_j}{Z_i}, \quad (7)$$

Нагрузку от катка, действующую на слабое основание, определяют согласно схеме (рис.3.1.1) по формуле:

$$P_K = \frac{M_K}{(2h_{сл} + d)\, l}, \quad (8)$$

где $h_{сл}$ - толщина уплотняемого слоя отсыпки, м;
l - длина вальца виброкатка, м;
$M_к$ - максимальная нагрузка на поверхности слоя от катка с вибрацией, т.
d- длина следа катка, м

Длина следа катка d определяется по формуле [10]:

$$d = \xi \sqrt{\frac{qr}{E_0}}, \quad (9)$$

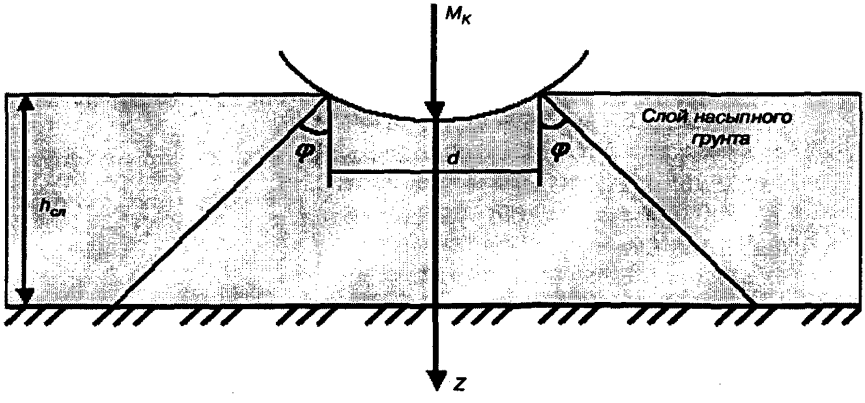


Рис. 3.1.1 Схема для определения нагрузки на основание от действия катка

где q - линейное давление, т/м;

r - радиус вальца, м;

E_0 - модуль деформации насыпного грунта, т/м^2;

ξ - коэффициент перехода, который зависит от характера эпюры распределения давлений под вальцом катка.

Для упрощения практических расчётов величиной следа от катка пренебрегают.

Основную характеристику слабых оснований - модуль деформаций E определяют по следующим формулам:

$$\Delta E_{ij} = \frac{(E_{max\,i} - E_{min\,i})(J_{Lij} - \frac{W_{ij} - W_{pi}}{J_{pi}})}{J_{L\,max\,i} - J_{L\,min\,i}}, \qquad (10)$$

$$W_{ij} = W_{np} - \left(\frac{W_{np} S_{ij}}{h_{Ti}}\right), \qquad (11)$$

$$E_{ij} = E_{ij-1} + \Delta E_{ij}\ , \qquad (12)$$

где E_{ij} - модуль деформации i-го слоя основания после отсыпки j-го слоя насыпи, т/м^2;

ΔE_{ij} - изменение модуля деформации i-го слоя основания после отсыпки j-го слоя насыпи, т/м^2;

W_{ij} - природная влажность грунта i-го слоя основания после отсыпке j-го слоя насыпи, %;

S_{ij} - осадка i-го слоя основания после отсыпки j-го слоя насыпи, м;

h_{Ti} - толщина i-го слоя основания, м;

$E_{max\,i}$ и $E_{min\,i}$ - максимальная и минимальная границы модуля деформации i-го слоя основания, т/м^2;

$J_{Lmax\,i}$ и $J_{Lmin\,i}$ - максимальный и минимальный показатель консистенции грунта i-го слоя основания;

W_{pi} - влажность на границе раскатывания, %;

J_{pi} - число пластичности i-го слоя основания.

Формулы (2) - (12) допускают учёт неоднородности основания, так как в них выделены характеристики грунта разной консистенции. Суть методики состоит в том, что после отсыпки первого и последующих слоёв насыпи осадка и характеристики грунтов пересчитываются, и используются в качестве исходных данных для следующего шага расчётов. Одновременно появляется

возможность целенаправленно улучшать строительные свойства грунтов при условии обеспечения устойчивости.

При управлении технологическими процессами [2] в каждом слое отсыпки необходимо в величине общей нагрузке на основание учесть параметры строительной нагрузки и принять в качестве управляемых параметров: толщину слоя и режим работы грунтоуплотняющей машины (скорость, частоту и амплитуду вибрации). Наибольшее влияние оказывают амплитуда вибрации и масса катка.

3.2. Примеры расчёта осадки насыпи на слабом основании при применении интенсивной технологии на реальных объектах

Пример 1.

При строительстве насыпи высотой H = 5,6 м (рис.3.2.1) на участке железнодорожной линии Карпогоры-Вендинга разработаны два варианта интенсивной технологии:

Вариант 1. Отсыпка насыпи слоями по 0,8 м и уплотнение их виброкатком HAMM 2520D массой 17 т;

Вариант 2. Отсыпка насыпи слоями по 0,4 м и уплотнение их виброкатком HAMM 2520D массой 17 т.

Исходные данные для расчётов приведены в таблицах 3.2.1 - 3.2.3.

Значения проекции откоса j-го слоя насыпи a_j и половины ширины j-го слоя насыпи b_j поверху приведены в таблицах 3.2.4 и 3.2.5, значения R_1, R_2 и $P_к$ в таблицах 3.2.6 и 3.2.7.

Используя полученные данные, определяют зависимость осадки грунтов слабого основания при реализации интенсивной технологии.

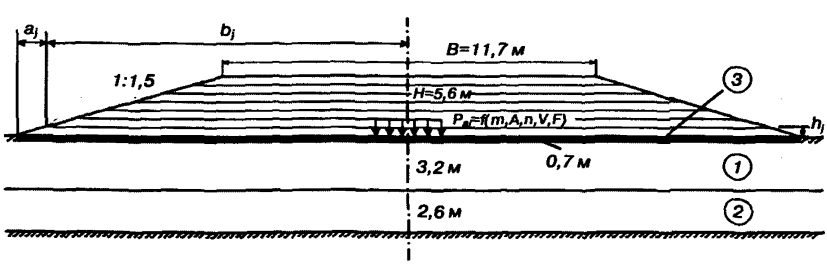


Рис. 3.2.1 Расчетная схема применения интенсивных технологических режимов при возведении железнодорожной насыпи высотой H=5,6 м:

1 - суглинок мягкопластичный; *2* - супесь текучепластичная; *3* - песчано-гравийная смесь

Таблица 3.2.1

Характеристика насыпи и катка

Параметры насыпи	Значения параметров
Плотность грунта насыпи, т/м^3	1,65
Проектная высота насыпи, м	5,6
Толщина отсыпаемого слоя, м	0,8 (0,4)
Ширина основной площадки, м	11,7
Крутизна откоса	1,5
Количество слоев насыпи	7 (14)
Количество слоев основания	2
Каток	
Масса, т	17
Вынуждающая сила, кН	190
Суммарная нагрузка от катка, кН	360
Длина вальца катка, м	2
Ширина следа от катка, м	0,4

Таблица 3.2.2

Характеристика слоев основания

Наименование показателей	1-й слой	2-й слой
Расстояние от поверхности основания до середины слоя, м	1,1	4,6
Начальный модуль деформации, т/м^2	1300	2000
Мощность слоя грунта основания, м	2,2	4,8
Природная влажность, %	24	22
Влажность на границе раскатывания, %	16	17
Число пластичности J_p, %	24	22
Макс. коэффициент консистенции $J_{Lmax\,i}$	1	1
Мин. коэффициент консистенции $J_{Lmin\,i}$	0	0
Макс. граница модуля деформации, т/м^2	1900	3800
Мин. граница модуля деформации, т/м^2	600	1250
Наименование грунта слабого основания	*Суглинок*	*Супесь*

Таблица 3.2.3

Прочностные характеристики грунта основания

Наименование параметра	1-й слой	2-й слой
Плотность грунта основания, т/м^3	1,92	1,86
Угол внутреннего трения, град	16,3	18
Сцепление грунта, т/м^2	1,5	0,2
Средневзвешенная плотность при переувлажненных грунтах, т/м^3	0,92	0,9
Глубина расположения данного горизонта, м	2,2	7
Величина касательных напряжений для заданного горизонта, доли	0,14	0,16

Таблица 3.2.4

Значения a_j и b_j для 1-го варианта уплотнения

Слои	Проекция откоса насыпи a_j, м	Половина основания отсыпанного слоя b_j, м
1	1,2	13,05
2	2,4	11,85
...	...	...
6	7,2	7,05
7	8,4	5,85

Таблица 3.2.5

Значения a_j и b_j для 2-го варианта уплотнения

Слои	Проекция откоса насыпи a_j, м	Половина основания отсыпанного слоя b_j, м
1	0,6	13,05
2	1,2	13,05
3	1,8	12,45
...	...	...
14	8,4	5,85

Таблица 3.2.6

Значения R_1, R_2 и P_K для 1-го варианта уплотнения

Высота насыпи H_j, м	Нагрузка от катка P_K, т/м^2	Суглинок мягкопластичный		Супесь текучепластичная	
		R1(1)	*R2(1)*	*R1(2)*	*R2(2)*
0,8	11,25	0,0102	1,4488	0,0262	1,2387
1,6	5,63	0,0224	1,4366	0,057	1,2079
...	...	...	...	...	...
5,6	1,61	0,1552	1,3038	0,3498	0,9151

Таблица 3.2.7

Значения R_1, R_2 и P_K для 2-го варианта уплотнения

Высота насыпи H_j, м	Нагрузка от катка P_K, т/м^2	Суглинок мягкопластичный		Супесь текучепластичная	
		R1(1)	*R2(1)*	*R1(2)*	*R2(2)*
0,4	22,5	0,0034	1,4904	0,0128	1,2458
0,8	11,25	0,0071	1,4867	0,0266	1,2319
1,2	7,5	0,0111	1,4827	0,0417	1,2169
...	...	...	...	...	...
5,6	1,61	0,1088	1,3849	0,3541	0,9044

Вариант1: виброкаток массой 17 т, отсыпка грунта насыпи слоями по 0,8 м.

Первый слой насыпи:

а) Осадка 1-го слоя основания (мягкопластичный суглинок), при послойной отсыпке насыпи:

$$S_{\Gamma 11}=\frac{(2,2\text{-}0)\cdot 1,65\cdot(0,8+0)\cdot\left(2\cdot 0,0071+1,4867+\dfrac{2\cdot 13,05}{1,2}\,0,0071\right)}{3,14\cdot 1300}=0,001\text{ м}$$

$$S_{K11}=\frac{(2{,}2\text{-}0)\cdot 11{,}25\cdot\left(2\cdot 0{,}0071+1{,}4867+\frac{2\cdot 13{,}05}{1{,}2}\,0{,}0071\right)}{3{,}14\cdot 1300}=0{,}010\ \text{м}$$

б) Осадка 2-го слоя основания (текучепластичная супесь):

$$S_{T21}=\frac{(4{,}8\text{-}0)\cdot 1{,}65\cdot(0{,}8+0)\cdot\left(2\cdot 0{,}0266+1{,}2319+\frac{2\cdot 13{,}05}{1{,}2}\,0{,}0266\right)}{3{,}14\cdot 2000}=0{,}002\ \text{м}$$

$$S_{K21}=\frac{(4{,}8\text{-}0)\cdot 11{,}25\cdot\left(2\cdot 0{,}0266+1{,}2319+\frac{2\cdot 13{,}05}{1{,}2}\,0{,}0266\right)}{3{,}14\cdot 2000}=0{,}016\ \text{м}$$

$$S_{общ\text{-}1}=\Sigma\, S_{Ti1}+\Sigma\, S_{Ki1}=0{,}029\ \text{м}$$

В таком же порядке были проведены расчёты для оставшихся слоёв. Общая осадка основания насыпи при первом технологическом варианте $S_{общ}$ =0,150 м.

После отсыпки каждого слоя производилось уточнение модуля деформации E_i.

Первый слой насыпи:

а) Изменение модуля деформации 1-го слоя основания (мягкопластичный суглинок):

$$\Delta E_{11}=\frac{(1900\text{-}600)\cdot\left(0{,}73-\frac{23{,}68-16}{11}\right)}{1-0}=37{,}82\ \text{т/м}^2$$

$$W_{11}=24-\left(\frac{24\cdot 0{,}29}{2{,}2}\right)=23{,}68\ \%$$

$$E_{11}=1300+37{,}83=1337{,}82\ \text{т/м}^2$$

б) Изменение модуля деформации 2-го слоя основания (текучепластичная супесь):

$$\Delta E_{21}=\frac{(3800\text{-}1250)\cdot\left(0{,}83-\frac{21{,}87-17}{6}\right)}{1-0}=55{,}25\ \text{т/м}^2$$

$$W_{21} = 22 - \left(\frac{22 \cdot 0{,}029}{4{,}8}\right) = 21{,}87\ \%$$

$$E_{21} = 2000 + 55{,}25 = 2055{,}25\ \text{т/м}^2$$

Расчёты изменения модуля деформации при отсыпке последующих слоёв выполнены аналогично. Результаты расчётов осадки и изменения модуля деформации грунтов слабого основания насыпи Н = 5,6 м приведены в таблицах 3.2.8 и 3.2.9.

Таблица 3.2.8

Результаты расчета осадки и модуля деформации для варианта 1

Слои	Высота насыпи H, м	Общая осадка насыпи, м	Изменение модуля деформации 1-го слоя $E_{1,i}$, т/м^2	Изменение модуля деформации 2-го слоя $E_{2,i}$, т/м^2
0	0	0	1300	2000
1	0,8	0,029	1337,82	2055,25
...	...	...	...	...
7	5,6	0,15	1493,82	2293,25

Таблица 3.2.9

Результаты расчета осадки и модуля деформации для варианта 2

Слои	Высота насыпи H, м	Общая осадка насыпи, м	Изменение модуля деформации 1-го слоя $E_{1,i}$, т/м^2	Изменение модуля деформации 2-го слоя $E_{2,i}$, т/м^2
0	0	0	1300	2000
1	0,4	0,053	1368,55	2102
2	0,8	0,08	1402,82	2157,25
...	...	...	...	...
14	5,6	0,3	1686,45	2582,25

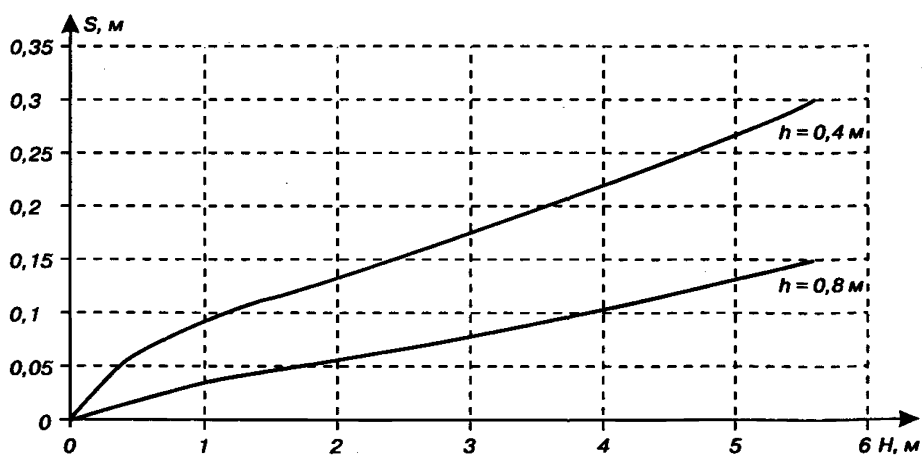


Рис. 3.2.2 Зависимость осадки основания от режима отсыпки насыпи Н=5,6 м

По результатам расчётов построены графики, на которых наблюдается изменение осадки грунтов слабого основания и модуля деформации в процессе роста насыпи (рис. 3.2.2 и 3.2.3).

Были проведены технологические расчёты с применением различных вибрационных катков и построены графики изменения деформационных характеристик от общей нагрузки на слабое основание (рис. 3.2.4).

Сравнение вариантов интенсивной технологии показывает, что осадку грунта слабого основания можно увеличить в 1,8 - 2 раза, если уменьшить толщину отсыпки в 2 раза, увеличивая при этом число слоёв. Это изменение просматривается с поочерёд-

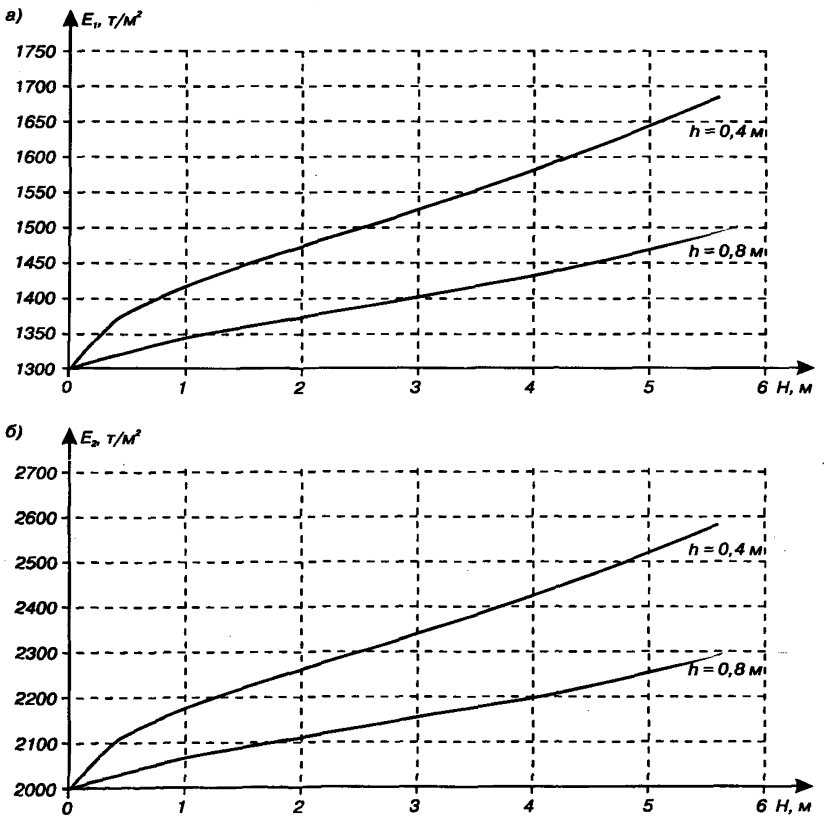


Рис. 3.2.3 Зависимость модуля деформации грунтов основания от режима отсыпки насыпи:

а - суглинка мягкопластичного; *б* - супеси текучепластичной

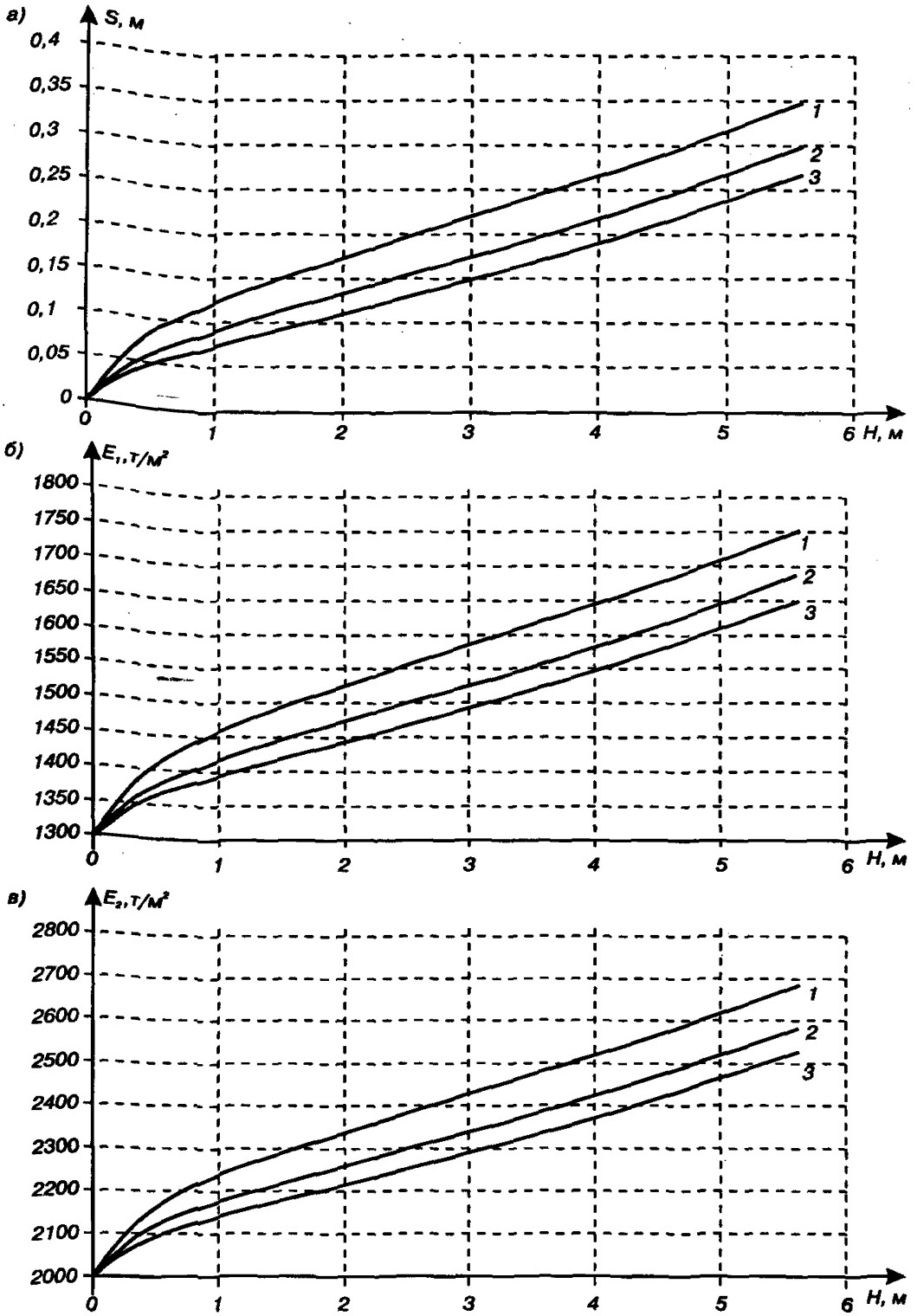


Рис. 3.2.4 Зависимость деформационных характеристик грунтов основания от общей нагрузки катков:

1 - Hamm 2720 D (494 кН); *2* - Hamm 2520 D (360 кН); 3 - ДУ-85 (280 кН); *а* - изменение осадки; б,в - изменение модуля деформации 1-го слоя основания, 2-го слоя основания

ной сменой консистенции грунта. Результаты изменения модуля деформации показывают, что изменение режима отсыпки и уплотнения увеличивает модуль деформации грунтов до максимального значения.

Анализ результатов показывает, что наибольшее влияние на изменение деформационных характеристик (S и E) оказывают параметры катка (табл. П.3): общая нагрузка катка, амплитуда и частота вибрации.

Вместе с тем, экспериментальные расчёты для разных технологических режимов показали необходимость контроля безопасности отсыпки. Предельное состояние грунтов наступает в наиболее уязвимом строительном этапе: при отсыпке первого слоя малой толщины, когда на основание действует наибольшая вибрационная нагрузка.

Пример 2:

Сооружение земляного полотна автомагистрали на участке подхода к мостовому переходу через р. Каму. Рассмотрим два варианта интенсивной технологии, основанные на применении грунтоуплотняющего виброкатка ДУ-85 массой 13т:

Вариант 1: виброкаток 13 т, толщина отсыпки слоя 0,4 м;
Вариант 2: виброкаток 13 т, толщина отсыпки слоя 0,6 м.

В этом примере использованы исходные данные участка насыпи H = 4 м (рис. 3.2.5) на ПК 28+00 с применением интенсивных технологических режимов (табл. 3.2.10 - 12).

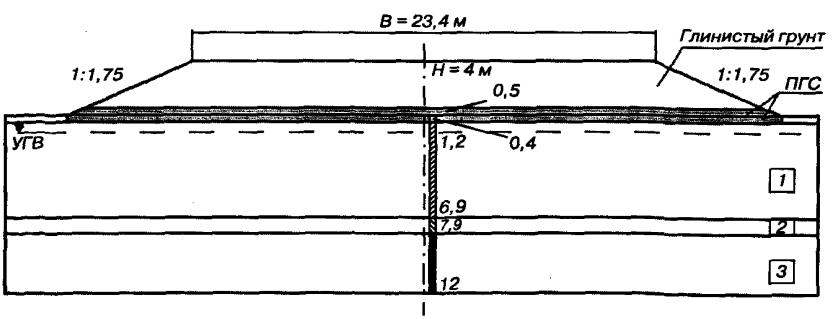


Рис. 3.2.5 Насыпь высотой 4 м на слабом основании
1 - мягкопластичная глина; *2* - песок мелкий; 3- гравийный грунт

Значения проекции откоса j-го слоя насыпи a_j и половины ширины j-го слоя насыпи b_j приведены в таблицах 3.2.13 и 3.2.14.

Таблица 3.2.10

Характеристика насыпи и катка

Параметры	Значения параметров
Насыпь Плотность грунта насыпи, т/м^3	1,9
Проектная высота насыпи, м	4
Толщина отсыпаемого слоя, м	0,4 (0,6)
Ширина основной площадки, м	23,4
Крутизна откоса	1,75
Количество слоёв насыпи	2
Каток	
Масса, т	13
Вынуждающая сила, кН	150
Суммарная нагрузка от катка, кН	280
Длина вальца катка,м	2
Ширина следа от катка, м	0,4

Таблица 3.2.11

Характеристика слоев основания

Наименование показателей	1-й слой	2-й слой
Расстояние от поверхности основания до середины слоя, м	0,4	3,65
Начальный модуль деформации, т/м^2	641	641
Мощность слоя грунта основания, м	0,8	5,7
Природная влажность, %	33	33
Влажность на границе раскатывания, %	20	20
Число пластичности J_p, %	21	21
Max коэффициент консистенции, $J_{Lmax\,i}$	1	1
Min коэффициент консистенции, $J_{Lmin\,i}$	0	0
Max граница модуля деформации, т/м^2	2500	2500
Min граница модуля деформации, т/м^2	300	300
Наименование грунта слабого основания	*Глина*	*Глина*

Таблица 3.2.12

Прочностные характеристики грунта основания

Наименование параметра	1-й слой	2-й слой
Плотность грунта основания, т/м^3	1,86	1,86
Угол внутреннего трения, град	7,3	7,3
Сцепление грунта, т/м^2	0,7	0,7
Средневзвешенная плотность при переувлажненных грунтах, т/м^3	1,86	1,86
Глубина расположения данного горизонта, м	0,8	6,5
Величина касательных напряжений для заданного горизонта, доли	0,04	0,2

Результаты расчётов размеров насыпи R_1, R_2 и нагрузки от катка на основание отсыпанного слоя P_K приведены в таблицах 3.2.15 и 3.2.16.

Таблица 3.2.13

Значения a_i и b_i для 1-го варианта уплотнения

Слои	Проекция откоса насыпи a_i, м	Половина основания отсыпанного слоя b_i, м
1	0,7	18
2	1,4	17,3
...	...	...
10	7	11,7

Таблица 3.2.14

Значения a_i и b_i для 2-го варианта уплотнения

Слои	Проекция откоса насыпи a_i, м	Половина основания отсыпанного слоя b_i, м
1	1,05	17,65
2	2,1	16,6
...	...	...
7	7	11,7

Таблица 3.2.15

Значения R_1, R_2 и $P_к$ для 1-го варианта уплотнения

Высота насыпи H_i, м	Нагрузка от катка $P_{кг}$, т/м^2	Глина мягкопластичная (выше УГВ)		Глина мягкопластичная (ниже УГВ)	
		R1(1)	*R2(1)*	*R1(2)*	*R2(2)*
0,4	17,5	0,0008	1,5486	0,0073	1,3707
0,8	8,75	0,0017	1,5477	0,0152	1,3629
...	...	...	...	...	...
4	1,75	0,0128	1,5366	0,1096	1,2684

Таблица 3.2.16

Значения R_1, R_2 и $P_к$ для 2-го варианта уплотнения

Высота насыпи H_i, м	Нагрузка от катка $P_{кг}$, т/м^2	Глина мягкопластичная (выше УГВ)		Глина мягкопластичная (ниже УГВ)	
		R1(1)	*R2(1)*	*R1(2)*	*R2(2)*
0,6	11,67	0,0013	1,5481	0,0112	1,3669
1,2	5,83	0,0027	1,5467	0,0237	1,3544
...	...	...	...	...	...
4	1,75	0,0128	1,5366	0,1096	1,2684

Используя полученные данные, определяют зависимость осадки грунтов слабого основания при реализации интенсивной технологии.

Вариант1: виброкаток 13 т, отсыпка грунта насыпи слоями по 0,4 м.

Первый слой насыпи:

а) Осадка 1-го слоя основания (глина мягкопластичная), при послойной отсыпке насыпи:

$$S_{Л1} = \frac{(0,8-0)\cdot 1,9\cdot(0,4+0)\cdot\left(2\cdot 0,0008+1,5486+\frac{2\cdot 18}{0,7}\,0,0008\right)}{3,14\cdot 641} = 0,001 \text{ м}$$

$$S_{K11} = \frac{(0,8\text{-}0)\cdot 17,5\cdot\left(2\cdot 0,0008+1,5486+\frac{2\cdot 18}{0,7}\,0,0008\right)}{3,14\cdot 641} = 0,011 \text{ м}$$

б) Осадка 2-го слоя основания (глина мягкопластичная):

$$S_{Г21} = \frac{(5,7\text{-}0)\cdot 1,9\cdot(0,4+0)\cdot\left(2\cdot 0,0008+1,5486+\frac{2\cdot 18}{0,7}\,0,0073\right)}{3,14\cdot 641} = 0,004 \text{ м}$$

$$S_{K21} = \frac{(5,7\text{-}0)\cdot 17,5\cdot\left(2\cdot 0,0073+1,3707+\frac{2\cdot 18}{0,7}\,0,0073\right)}{3,14\cdot 641} = 0,087 \text{ м}$$

$$S_{общ\text{-}1} = \Sigma\, S_{Г1} + \Sigma\, S_{Ki1} = 0,103 \text{ м}$$

В таком же порядке были проведены расчёты для оставшихся слоёв. Общая осадка основания насыпи при первом технологическом варианте $S_{общ}$ =0,429 м.

Расчёты отсыпки всех слоёв насыпи по второму варианту интенсивной технологии проведены аналогично. После расчётов каждого слоя производилось уточнение E_i. Результаты расчётов осадки и модуля деформации слабого основания насыпи H = 4 м на ПК 28+00 приведены в таблицах 3.2.17 и 3.2.18.

По результатам расчётов построены графики, на которых наблюдается изменение осадки грунтов слабого основания и модуля деформации в процессе возведения насыпи (рис. 3.2.6 - 3.2.8).

Аналогичным способом были получены данные для насыпей на ПК 5+17,77 (рис. 3.2.9) и ПК 9+50 (рис. 3.2.10) при двух режимах отсыпки и построены графики зависимости осадки и мо-

Таблица 3.2.17

Результаты расчёта осадки и модуля деформации для 1-го варианта

Слой	Высота насыпи H, м	Общая осадка насыпи, м	Модуль деформации 1-го слоя $E_{1,i}$, т/м²	Модуль деформации 2-го слоя $E_{2,i}$, т/м²
0	0	0	641	641
1	0,4	0,103	1086,24	703,86
2	0,8	0,153	1302,05	734,24
...	...	...	...	...
9	3,6	0,392	2335	878,81
10	4	0,429	2495,29	900,81

Таблица 3.2.18

Результаты расчёта осадки и модуля деформации для 2-го варианта

Слой	Высота насыпи H, м	Общая осадка насыпи, м	Модуль деформации 1-го слоя $E_{1,y}$, т/м^2	Модуль деформации 2-го слоя $E_{2,y}$, т/м^2
0	0	0	641	641
1	0,6	0,072	952,14	685
...	...	...	...	...
6	3,6	0,263	1777,67	800,24
7	4	0,304	1954,71	825,38

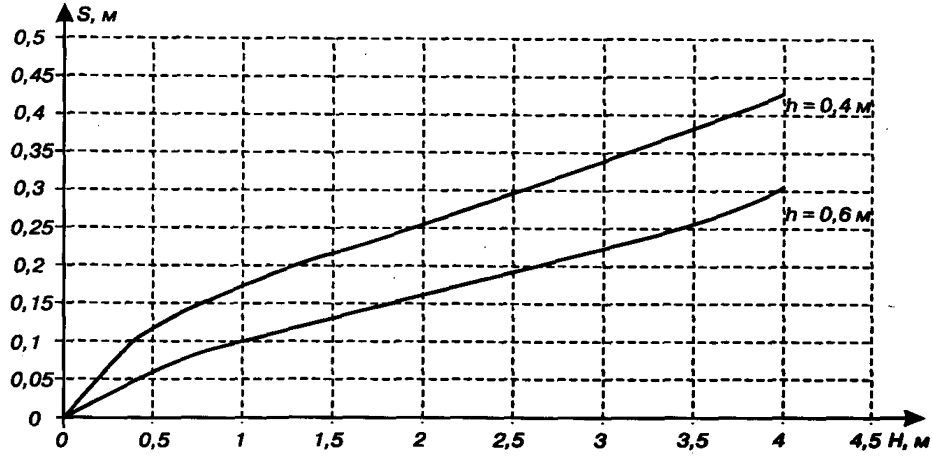


Рис. 3.2.6 Зависимость осадки основания от режима отсыпки насыпи H = 4 м

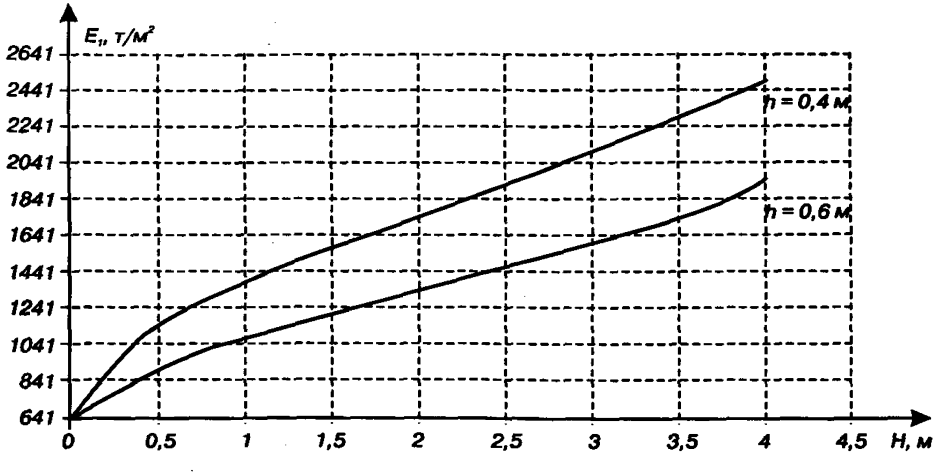


Рис. 3.2.7 Зависимость модуля деформации 1-го слоя основания (глина мягкопластичная) от режима отсыпки насыпи

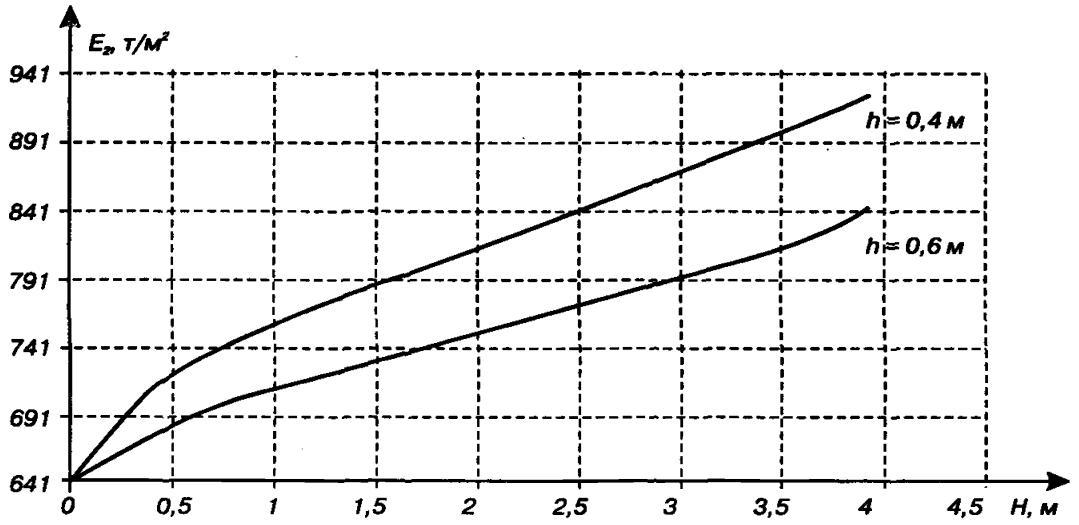


Рис. 3.2.8 Зависимость модуля деформации 2-го слоя основания (глина мягкопластичная) от режима отсыпки насыпи

Таблица 3.2.19

Результаты расчёта осадки и модуля деформации слабого основания насыпи H = 7,5 м на ПК 5+17,77 (каток массой 13 т, толщина слоев отсыпки 0,4 м)

Слой	Высота насыпи H, м	Общая осадка насыпи, м	Модуль деформации 1-го слоя $E_{1,p}$, т/м²	Модуль деформации 2-го слоя $E_{2,p}$, т/м²	Модуль деформации 3-го слоя $E_{3,p}$, т/м²
0	0	0	650	650	641
1	0,4	0,069	1067,86	806	830,62
2	0,8	0,098	1244,29	872,86	910,24
...	...	...	...	...	...
18	6,8	0,407	3114,43	1574,86	1757,76
19	7,5	0,429	3248,14	1625	1818,52

Таблица 3.2.20

Результаты расчёта осадки и модуля деформации слабого основания насыпи H = 7,5 м на ПК 5+17,77 (каток массой 13 т, толщина слоев отсыпки 0,6 м)

Слой	Высота насыпи H, м	Общая осадка насыпи, м	Модуль деформации 1-го слоя $E_{1,p}$, т/м²	Модуль деформации 2-го слоя $E_{2,p}$, т/м²	Модуль деформации 3-го слоя $E_{3,p}$, т/м²
0	0	0	650	650	641
1	0,6	0,055	982,43	774,43	791,86
2	1,2	0,082	1145,86	835,71	866,24
...	...	...	...	...	...
12	7,5	0,314	2551,71	1363,14	1502,14

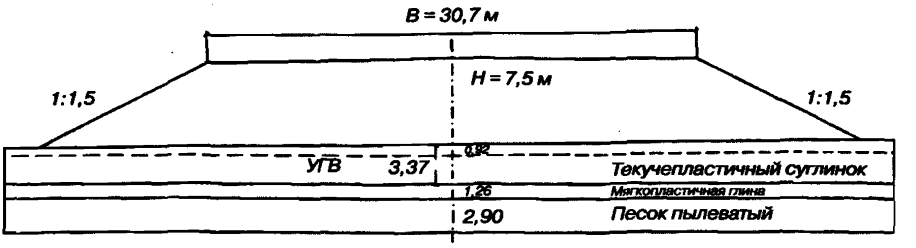


Рис. 3.2.9. Насыпь высотой 7,5 м на ПК 5+17,77

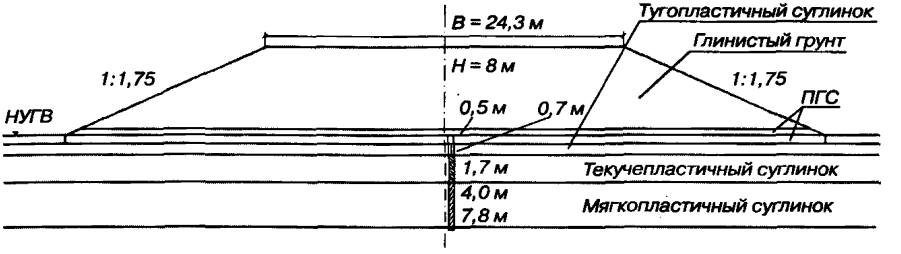


Рис. 3.2.10. Схема насыпи на ПК 9+50

дуля деформации слабого основания. Результаты расчёта осадки по поперечникам приведены в таблицах 3.2.19 - 3.2.22. По результатам расчётов построены графики, на которых можно проследить изменение осадки (рис. 3.2.11 и 3.2.12) и модуля деформации данных грунтов (рис. 3.2.13 - 3.2.18) в процессе послойного уплотнения слоёв насыпи виброкатком.

Таблица 3.2.21

Результаты расчёта осадки и модуля деформации слабого основания насыпи $H = 8$ м на ПК 9+50 (каток массой 13 т, толщина слоев отсыпки 0,4 м)

Слой	Высота насыпи H, м	Общая осадка насыпи, м	Модуль деформации 1-го слоя $E_{1,p}$, т/м^2	Модуль деформации 2-го слоя $E_{2,p}$, т/м^2	Модуль деформации 3-го слоя $E_{3,p}$, т/м^2
0	0	0	1347	650	1181
1	0,4	0,084	1675,25	854,29	1288,47
2	0,8	0,122	1823,13	945,29	1337
...	...	...	...	...	...
19	7,6	0,568	3561,88	2026,14	1907,27
20	8	0,6	3687	2104,14	1947,13

Таблица 3.2.22

Результаты расчёта осадки и модуля деформации слабого основания насыпи $H = 8$ м на ПК 9+50 (каток массой 13 т, толщина слоев отсыпки 0,6 м)

Слой	Высота насыпи H, м	Общая осадка насыпи, м	Модуль деформации 1-го слоя $E_{1,p}$, т/м^2	Модуль деформации 2-го слоя $E_{2,p}$, т/м^2	Модуль деформации 3-го слоя $E_{3,p}$, т/м^2
0	0	0	1347	650	1181
1	0,6	0,059	1577,75	793	1255,53
2	1,2	0,09	1698	867,29	1295,4
...	...	...	...	...	...
13	8	0,424	3001,25	1677	1721,8

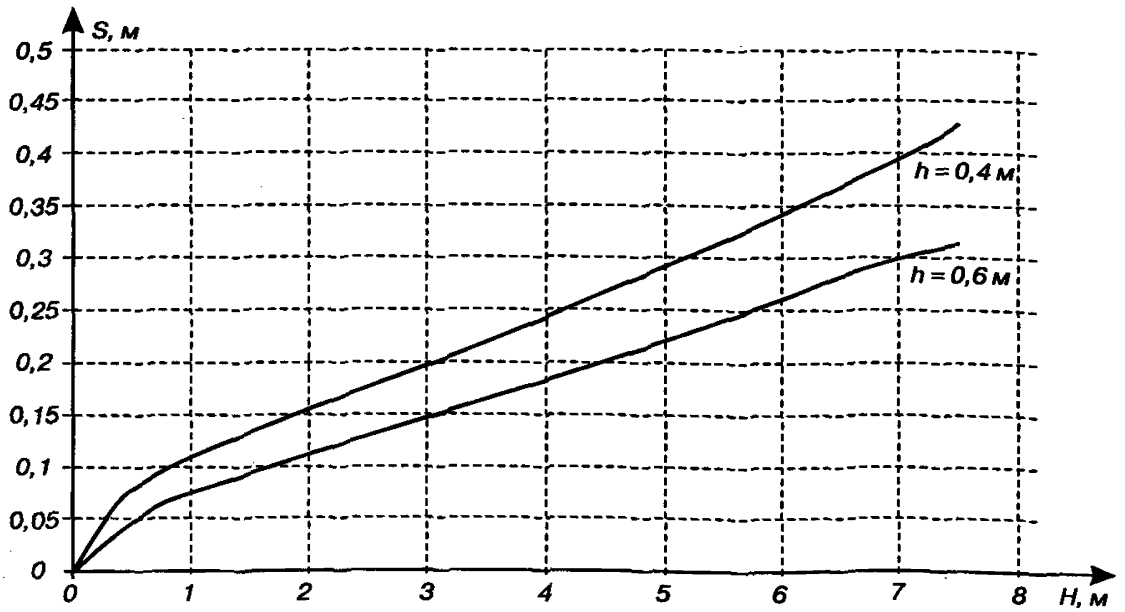


Рис. 3.2.11. Зависимость осадки основания от режима отсыпки насыпи $H = 7,5$ м на ПК 5+17,77 и уплотнения катком массой 13т

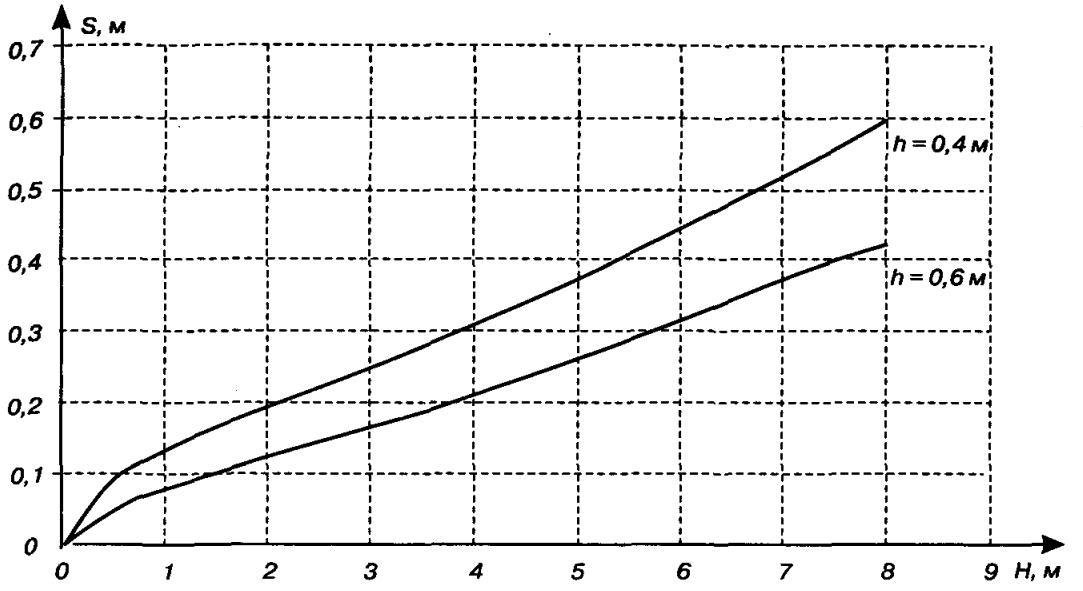


Рис. 3.2.12. Зависимость осадки основания от режима отсыпки насыпи H = 8 м на ПК 9+50

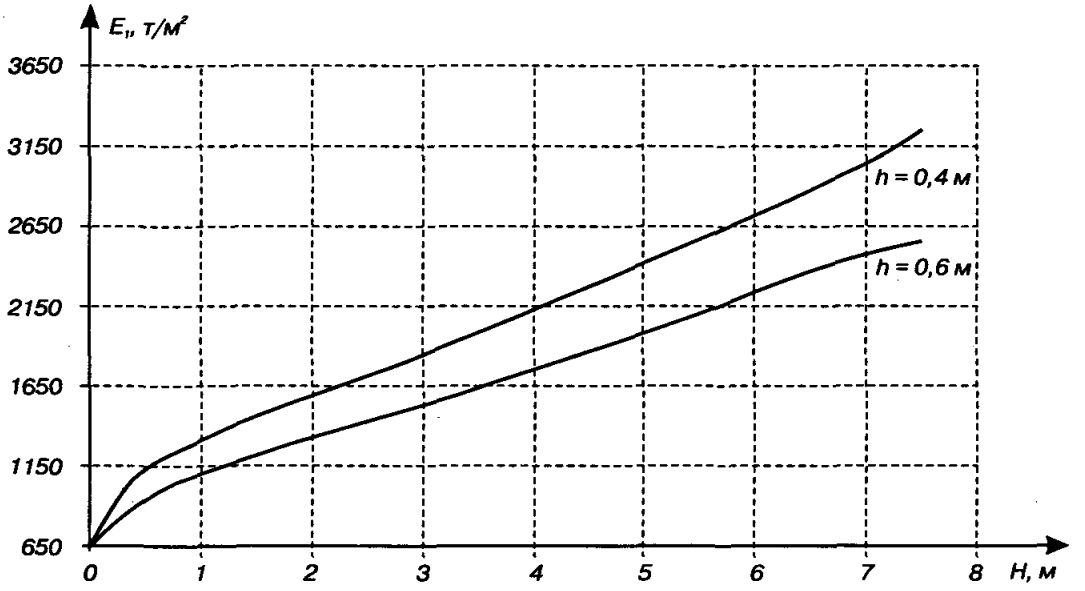


Рис. 3.2.13. Зависимость модуля деформации 1-го слоя основания от режима отсыпки насыпи H = 7,5 м

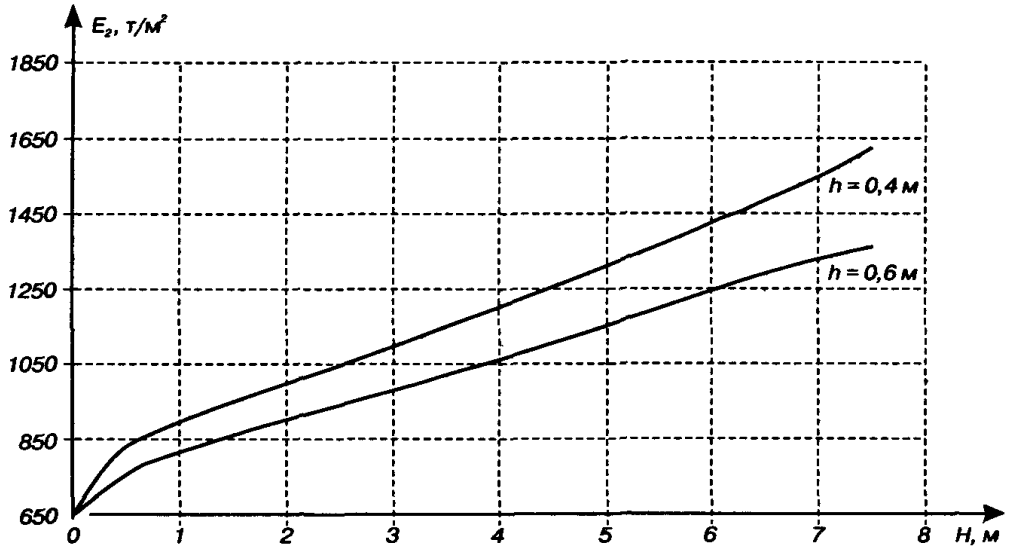


Рис. 3.2.14. Зависимость модуля деформации 2-го слоя основания от режима отсыпки насыпи H = 7,5 м

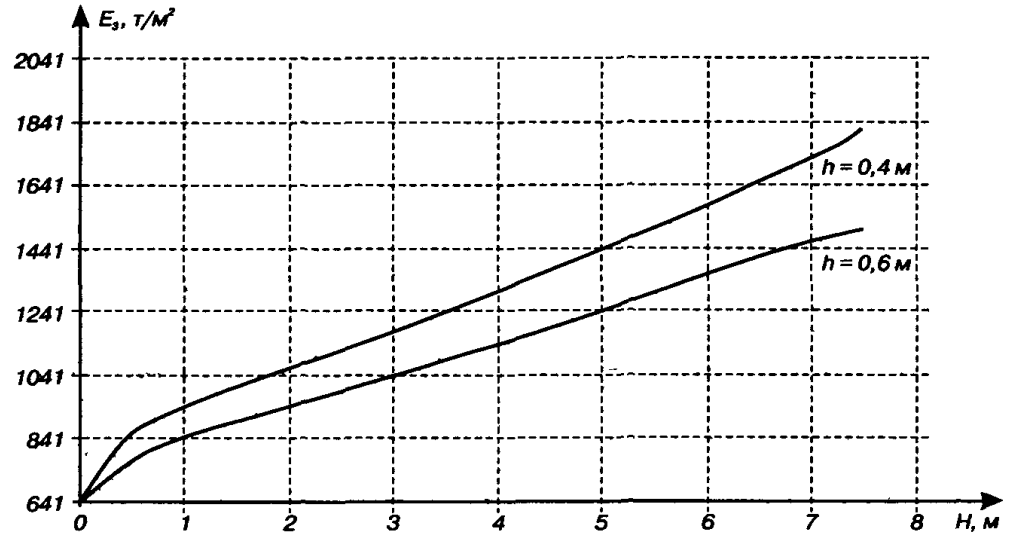


Рис. 3.2.15. Зависимость модуля деформации 3-го слоя основания от режима отсыпки насыпи H = 7,5 м

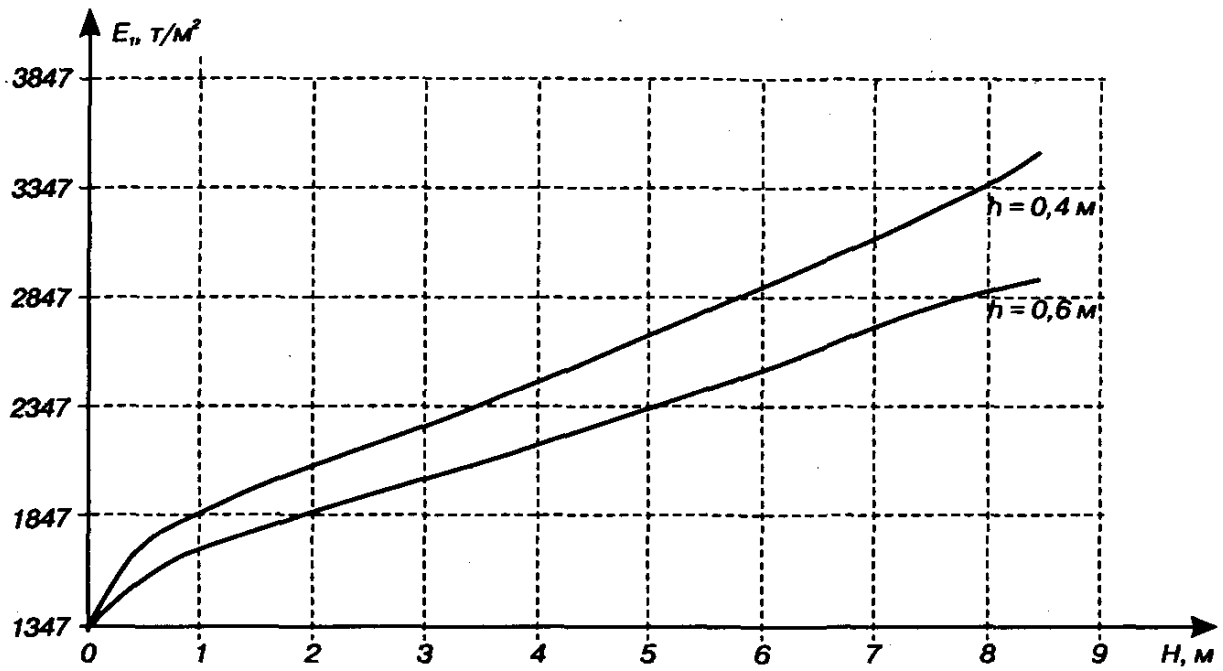


Рис. 3.2.16. Зависимость модуля деформации 1-го слоя основания от режима отсыпки насыпи H = 8 м

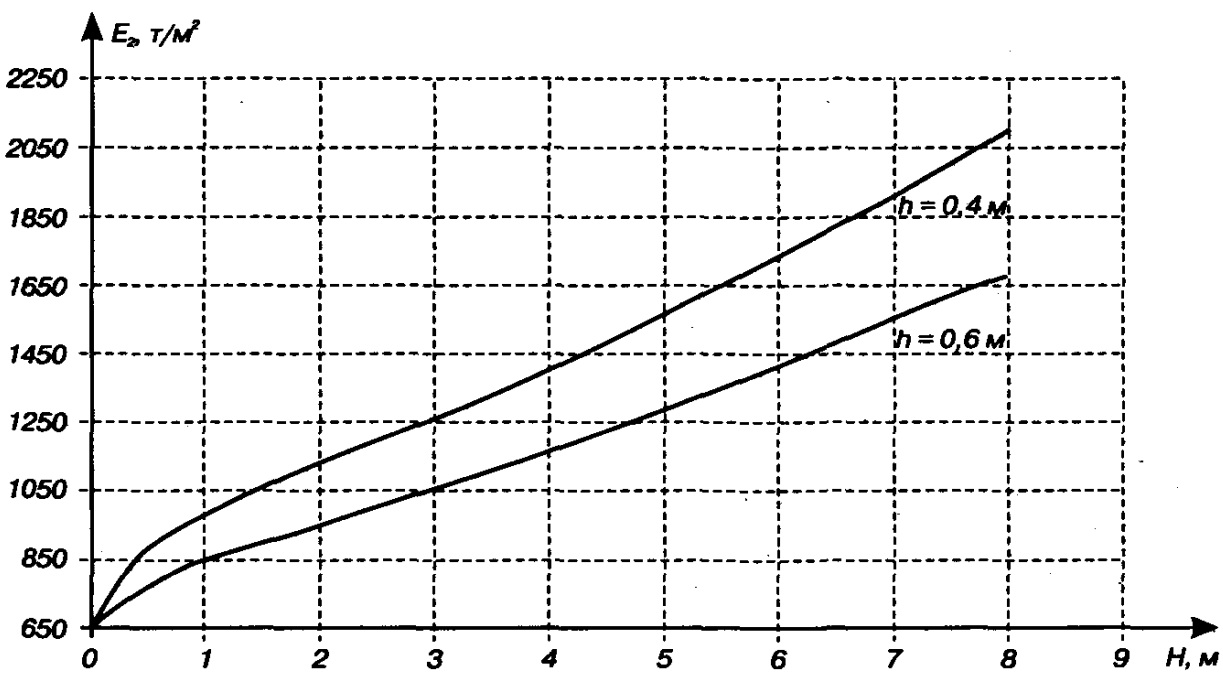


Рис. 3.2.17. Зависимость модуля деформации 2-го слоя основания от режима отсыпки насыпи H = 8 м

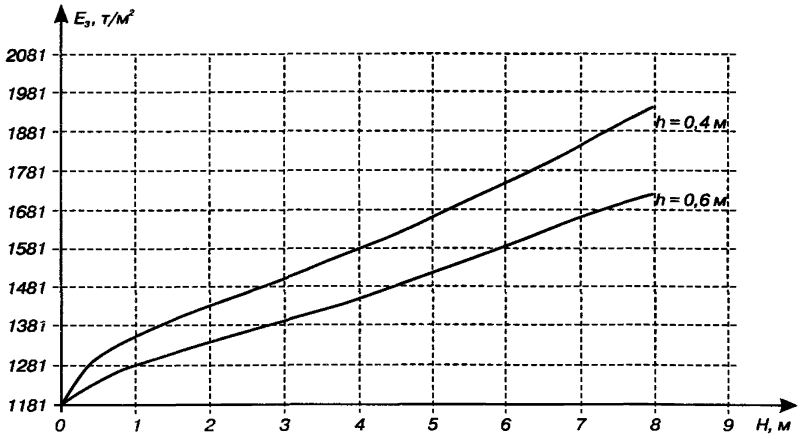


Рис. 3.2.18. Зависимость модуля деформации 3-го слоя основания от режима отсыпки насыпи H = 8 м

4. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ

4.1. Методика расчётов

После определения конечной осадки необходимо рассчитать устойчивость и определить тип основания по коэффициенту безопасности [1;8].

Ограничением применения интенсивной технологии возведения земляных сооружений является природная влажность грунта основания, поэтому в методике учитывается её влияние на устойчивость основания с помощью коэффициента безопасности $K_{без}$.

При низкой влажности силы внутреннего трения и сцепления между частицами противодействуют уплотнению. Максимальная плотность в сухом состоянии достигается при оптимальной влажности грунта, грунт становится легкоуплотняемым. При более высокой влажности и низкой водопроницаемости не достигается требуемая плотность грунта, т.е. повышенная влажность приводит к уменьшению плотности, что влияет на коэффициент безопасности.

Значение $K_{без}$ для многослойного основания в целом определяется минимальным значением коэффициента стабильности, установленного для слагающих слоев $K_{без} = K_{стаб}^{min}$ [9]. Коэффициент стабильности или безопасности для какого-либо слоя опре-

деляется как отношение безопасной нагрузки $P_{без}$ к расчетной $P_{расч}$.

$$K_{без}=\frac{P_{без}}{P_{расч}} \qquad (13)$$

где $P_{без}$ - безопасная нагрузка для заданного горизонта слабой толщи, т/м²;

$P_{расч}$ - расчётная нагрузка, равная:

$$P_{расч} = P_o + P_K, \qquad (14)$$

где P_o - проектная нагрузка на основание от веса сооружения, т/м².

$$P_o = \gamma_н (h + S), \qquad (15)$$

где $\gamma_н$ - средневзвешенная плотность грунта земляного сооружения, т/м³;

h - высота сооружения, м;

S - осадка, м;

$P_к$ - приведенная нагрузка (вес и вынуждающая сила) виброкатка, т/м².

Под $P_{без}$ для слоя понимается максимальная нагрузка на его поверхности, при которой ни в одной точке в рассматриваемом слое не возникает предельного равновесия. $P_{без}$ определяется для каждого слоя основания по формуле:

$$P_{без}=\frac{C+\gamma_{ср} Z\, tg\, \varphi}{\beta}, \qquad (16)$$

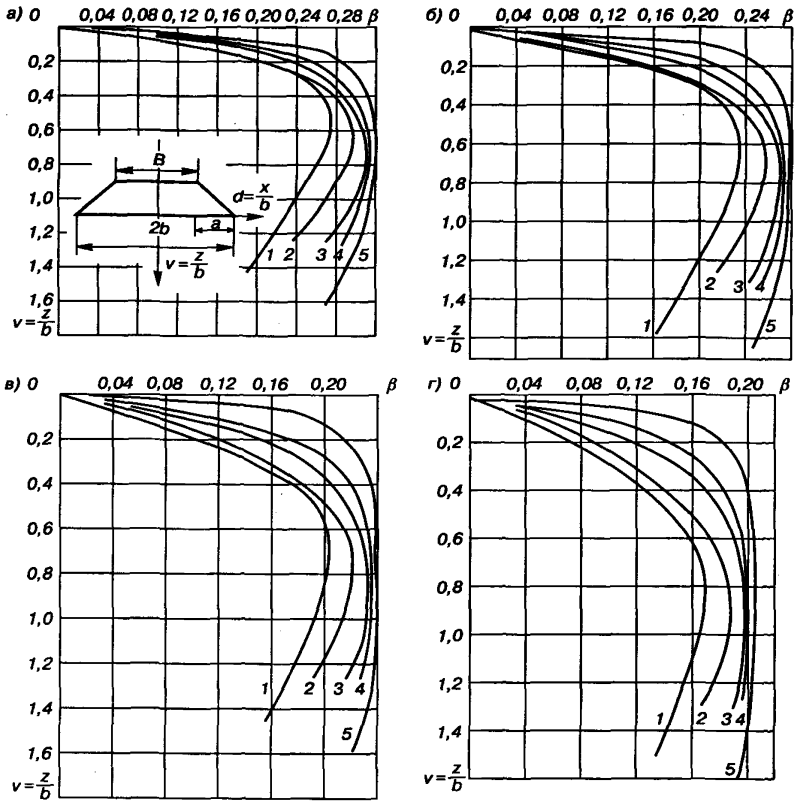
где C - сцепление грунта на расчетном горизонте, т/м²;

φ - угол внутреннего трения грунта на расчетном горизонте, град;

$\gamma_{ср}$ - средневзвешенная плотность грунта, расположенного выше рассматриваемого горизонта, т/м³;

Z - глубина расположения данного горизонта от уровня подошвы сооружения, м;

β - коэффициент, отражающий влияние касательных напряжений для данного горизонта, выраженных в долях от напряжений на поверхности основания, определяется по графикам (рис. 4.1.1).



Оценку устойчивости слабого основания также проводят по напряженно-деформируемому состоянию грунтов в различных точках основания (рис.4.1.2).

При определении устойчивости основания рассчитываются напряжения, которые возникают от расчётной нагрузки, представленной собственным весом насыпи и нагрузкой от катка. В этом случае используют коэффициент стабильности [5]:

$$K_{стаб} = \frac{C + \gamma_{ср} Z \operatorname{tg}\varphi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\cos\varphi} - \frac{\operatorname{tg}\varphi(\sigma_1 + \sigma_2)}{2}}$$

где σ_1 и σ_2 - нормальные напряжения, возникающие в грунте основания от веса насыпи и катка.

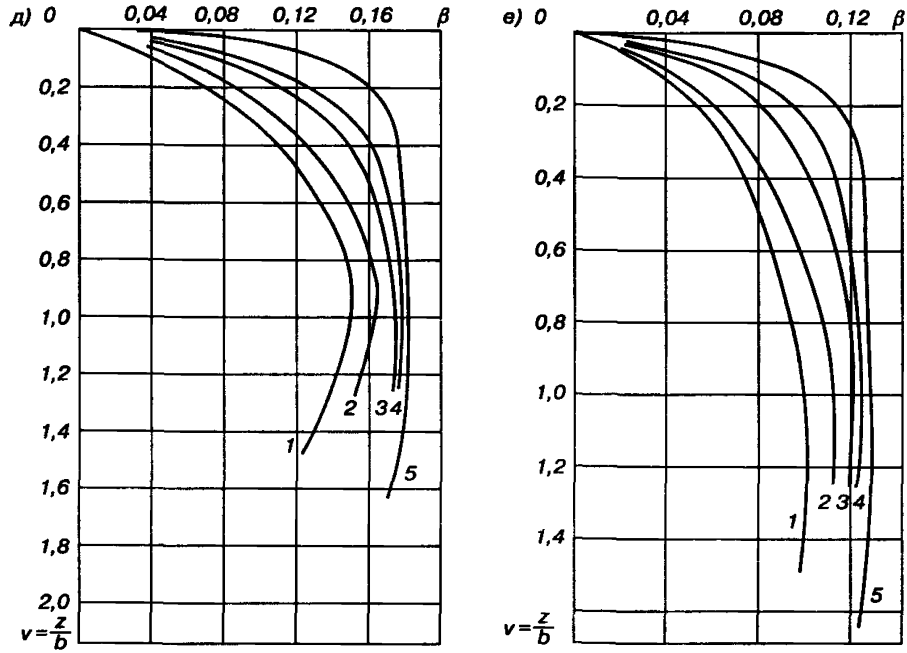


Рис. 4.1.1. Графики для определения коэффициента b при угле внутреннего трения: *а* - $\varphi = 0°$, *б* - $\varphi = 5°$, *в* - $\varphi = 10°$, *г* - $\varphi = 15°$, *д* - $\varphi = 20°$, *е* - $\varphi = 30°$; при отношении $2a/B$ равном: 1 - 10,0; 2 - 3,0; 3 - 1,0; 4 - 0,6; 5 - 0,2.

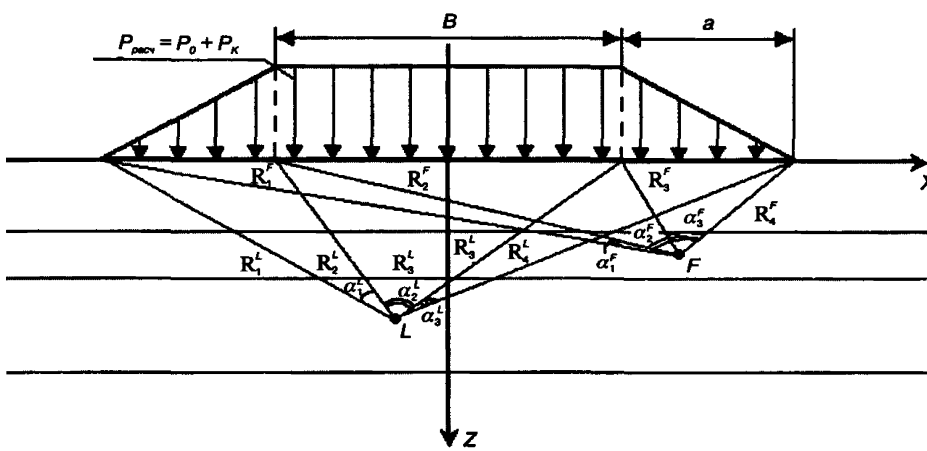


Рис. 4.1.2. Схема для прогноза устойчивости основания при оценке напряженно-деформированного состояния грунтов

При послойном возведении земляного сооружения в режиме интенсивной технологии при расчёта $K_{без}$ и $K_{стаб}$ для каждого слоя необходимо учитывать изменение прочностных характери-

стик грунта основания C и φ. С этой целью при последующей отсыпке и уплотнении слоя в качестве расчетных берутся C и φ, улучшенные за счёт динамического уплотнения ранее отсыпанных слоёв.

Интенсивная технология улучшает прочностные характеристики C и φ по следующей пошаговой схеме (под контролем $K_{без}$):

1) исходное состояние грунтов основания с характеристиками $\rho_{нач.}$, $W_{нач.}$, J_L, $C_{нач.}$, $\varphi_{нач.}$

2) уплотнение основания под нагрузкой $P_{расч} = P_{1\,слоя} + P_к$.

3) изменение характеристик грунта: ρ_1, $W_1 = W_{нач} - \Delta W$, J_L, C_1, φ_1 и так далее при последующем уплотнении слоёв насыпи.

Изменение характеристик С и φ устанавливают по результатам компрессионных и сдвиговых испытаний после отсыпки каждого слоя с учётом эффекта интенсивной технологии - увеличения плотности грунта ρ, уменьшения влажности W и улучшения J_L.

Их ориентировочные значения приведены в табл. П.1.2.

Если в результате расчётов $K_{без} \geq 1$, то в заданном режиме уплотнения и при принятой толщине слоя устойчивость конструкции обеспечена. Если $K_{без} < 1$, то необходимо изменить технологические параметры (или назначить дополнительные мероприятия).

Первоначальный выбор режима уплотнения (нагрузка от катка, скорость движения) и толщины отсыпанного слоя должен быть осуществлён по результатам пробного уплотнения.

На устойчивость грунтовых массивов влияет темп отсыпки насыпи. При $K_{без}$ близком к единице и быстром приложении нагрузки может произойти выпор грунта. В качестве контрольной характеристики принимается время τ достижения насыпью данной осадки S_τ, которая определяется по методике Н.А. Цытовича [7].

В случае нарушения устойчивости основания при оптимальном технологическом режиме рассматриваются дополнительные мероприятия для обеспечения устойчивости земляной конструкции:

- пригрузочные бермы;
- частичная замена слабого грунта;
- армирование слабого основания;
- различные свайные конструкции и др.

4.2. Примеры оценки устойчивости слабого основания

Пример 1

Расчеты безопасной нагрузки и коэффициента $K_{без}$ с учётом улучшения прочностных характеристик проведены для всех вариантов технологических режимов при послойной отсыпке насыпи на участке железнодорожной линии Карпогоры-Вендинга и сведены в таблицы 4.2.1 - 4.2.2.

Таблица 4.2.1

Результаты расчет $K_{без}$ для 1-го варианта уплотнения насыпи H = 5,6 м

Слой	Высота насыпи H, м	$K_{без1}$	$K_{без2}$
1	0,8	1,18	1,11
2	1,6	1,8	1,7
3	2,4	1,91	1,8
4	3,2	1,82	1,71
5	4	1,66	1,56
6	4,8	1,49	1,4
7	5,6	1,35	1,27

Таблица 4.2.2

Результаты расчет $K_{без}$ для 2-го варианта уплотнения насыпи H = 5,6 м

Слой	Высота насыпи H, м	$K_{без1}$	$K_{без2}$
1	0,4	0,62	0,53
2	0,8	1,12	0,95
3	1,2	1,44	1,23
4	1,6	1,63	1,39
5	2	1,71	1,46
6	2,4	1,73	1,47
7	2,8	1,7	1,45
8	3,2	1,64	1,4
9	3,6	1,58	1,34
10	4	1,5	1,28
11	4,4	1,43	1,22
12	4,8	1,37	1,17
13	5,2	1,3	1,11
14	5,6	1,24	1,06

Для примера определим значения коэффициента безопасности $K_{без}$ грунтов слабого основания при отсыпке первого и второго слоёв насыпи.

Первый слой насыпи (0,8 м; Рк =11,25 т/м², см табл.3.2.6):

а) Коэффициент безопасности $K_{без1}$ 1-го слоя основания (мягкопластичного суглинка):

$$P_{расч\ 1} = 1{,}65\ (0{,}8 + 0{,}029) + 11{,}25 = 12{,}62\ \text{т/м}^2$$

$$P_{без\ 1} = \frac{1{,}5 + 0{,}92 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}2924}{0{,}14} = 14{,}94\ \text{т/м}^2$$

$$K_{без} = \frac{P_{без\ 1}}{P_{расч\ 1}} = \frac{14{,}94}{12{,}62} = 1{,}18$$

б) Коэффициент безопасности $K_{без2}$ 2-го слоя основания (текучепластичная супесь):

$$P_{расч\ 2} = 1{,}65\ (0{,}8 + 0{,}029) + 11{,}25 = 12{,}62\ \text{т/м}^2$$

$$P_{без\ 2} = \frac{0{,}2 + 0{,}9 \cdot 7{,}0 \cdot 0{,}3249}{0{,}16} = 14{,}04\ \text{т/м}^2$$

$$K_{без\ 2} = \frac{P_{без\ 2}}{P_{расч\ 2}} = \frac{14{,}04}{12{,}62} = 1{,}11$$

Второй слой насыпи:

а) Коэффициент безопасности $K_{без1}$ 1-го слоя основания (мягкопластичного суглинка):

$$P_{расч\ 1} = 1{,}65\ (1{,}6 + 0{,}048) + 5{,}63 = 8{,}34\ \text{т/м}^2$$

$$P_{без\ 1} = \frac{1{,}52 + 0{,}92 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}3019}{0{,}14} = 15{,}2\ \text{т/м}^2$$

$$K_{без} = \frac{P_{без\ 1}}{P_{расч\ 1}} = \frac{15{,}2}{8{,}34} = 1{,}8$$

б) Коэффициент безопасности $K_{без2}$ 2-го слоя основания (текучепластичная супесь):

$$P_{расч\ 2} = 1{,}65\ (1{,}6 + 0{,}048) + 5{,}63 = 8{,}34\ \text{т/м}^2$$

$$P_{без\,2} = \frac{0{,}22 + 0{,}9 \cdot 7{,}0 \cdot 0{,}3286}{0{,}16} = 14{,}3 \text{ т/м}^2$$

$$K_{без\,2} = \frac{P_{без\,2}}{P_{расч\,2}} = \frac{14{,}3}{8{,}34} = 1{,}7$$

При отсыпке последующих слоёв были проведены аналогичные расчёты и построены графики изменения $K_{безi}$ слоев слабого основания в зависимости от послойного возведения насыпи (рис. 4.2.1).

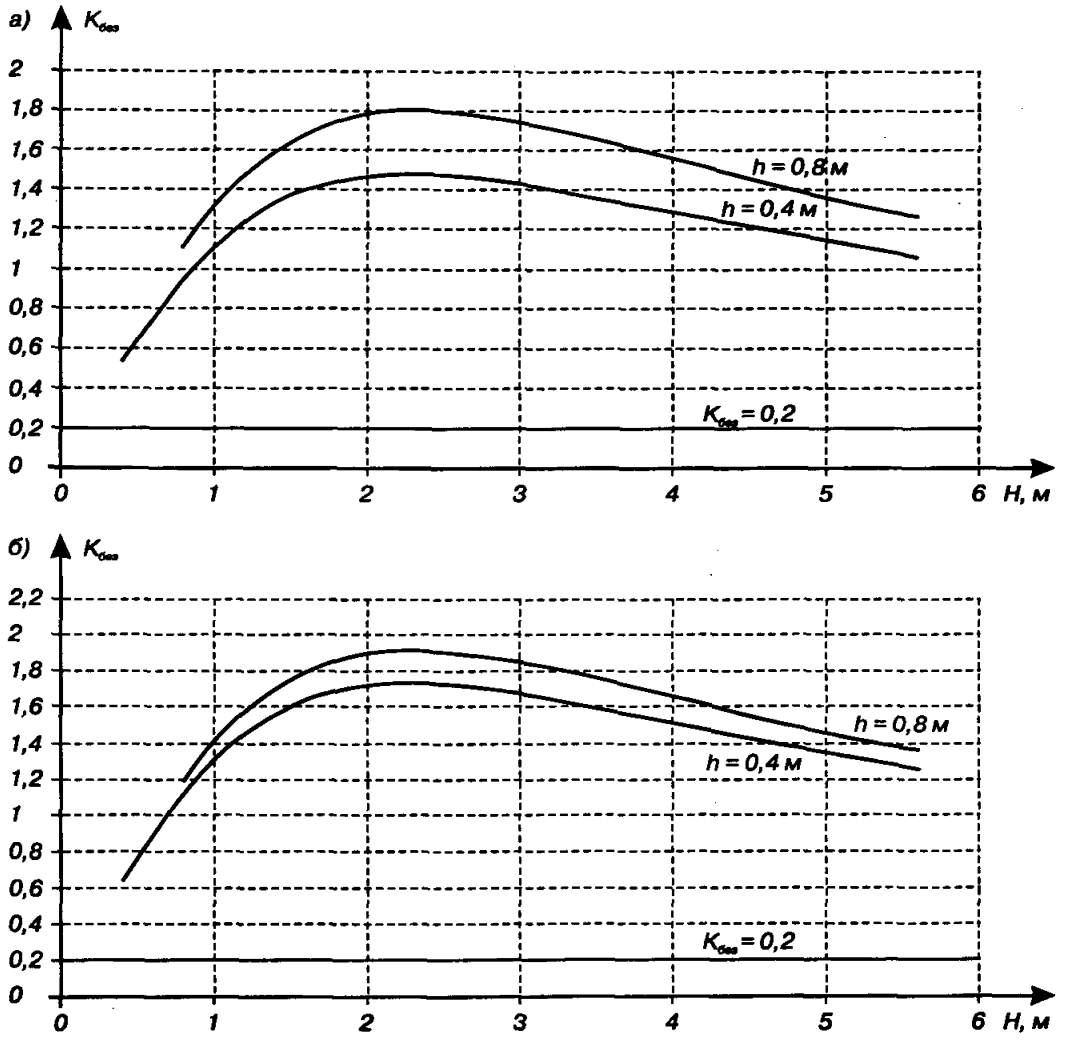


Рис. 4.2.1. Изменение $K_{без}$ в процессе послойной отсыпки насыпи высотой 5,6 м: *а* - слоя суглинка мягкопластичного, *б* - слоя супеси текучепластичной

Были проведены технологические расчёты с применением различных вибрационных катков и построены графики изменения $K_{без}$ от общей нагрузки на слабое основание при послойной отсыпке насыпи (рис. 4.2.2).

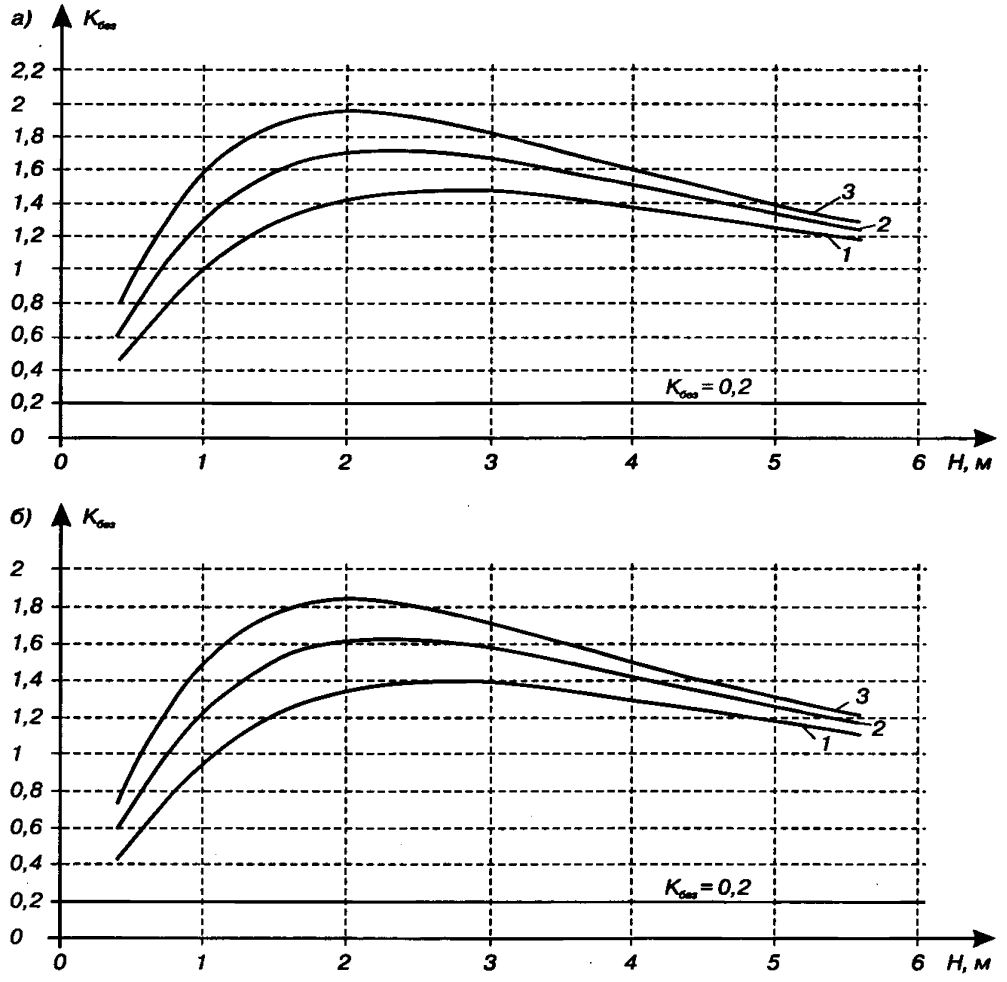


Рис. 4.2.2. Зависимость $K_{без}$ в процессе отсыпки насыпи слоями 0,4 м от общей нагрузки катков:

1 - Hamm 2720 D (494 кН), *2* - Hamm 2520 D (360 кН), *3* - ДУ-85 (280 кН); *а* - изменение $K_{без}$ 1-го слоя основания, *б* - изменение $K_{без}$ 2-го слоя основания

Применение интенсивной технологии позволило улучшить деформационные (ε, E) и прочностные (C, φ) характеристики грунта основания, при этом не происходит нарушение устойчивости слабого основания ($K_{без} \geq 1$).

Пример 2

Расчёт основной контрольной характеристики $K_{без}$ в зависимости от технологических решений проведён на примере возведения насыпи высотой Н = 7,5 м на ПК 5+17,77 и высотой Н = 8м на ПК 9+50. Характеристики грунтов основания даны в приложении 1.

По формулам (13) - (16), проведены расчёты и построены графики (рис.4.2.3 и 4.2.4) изменения коэффициента безопасно-

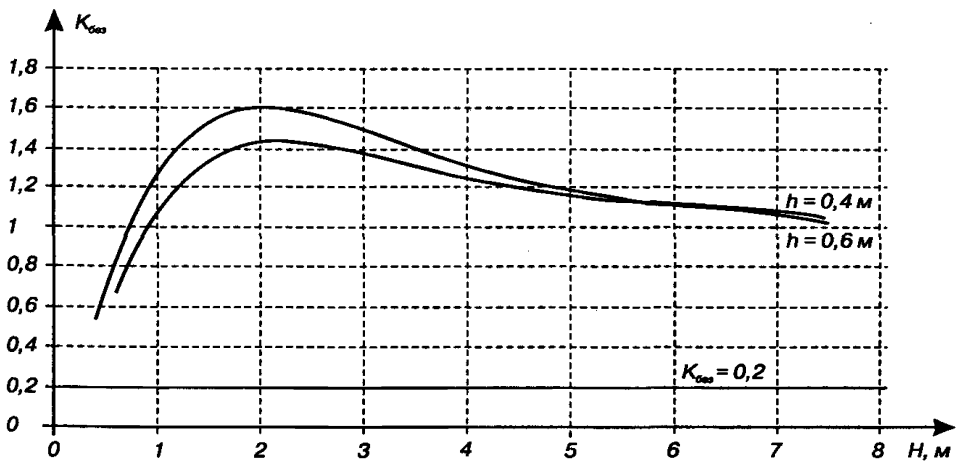


Рис. 4.2.3. Изменение $K_{без}$ суглинка текучепластичного в процессе послойной отсыпки насыпи высотой 7,5 м на ПК 5+17,77

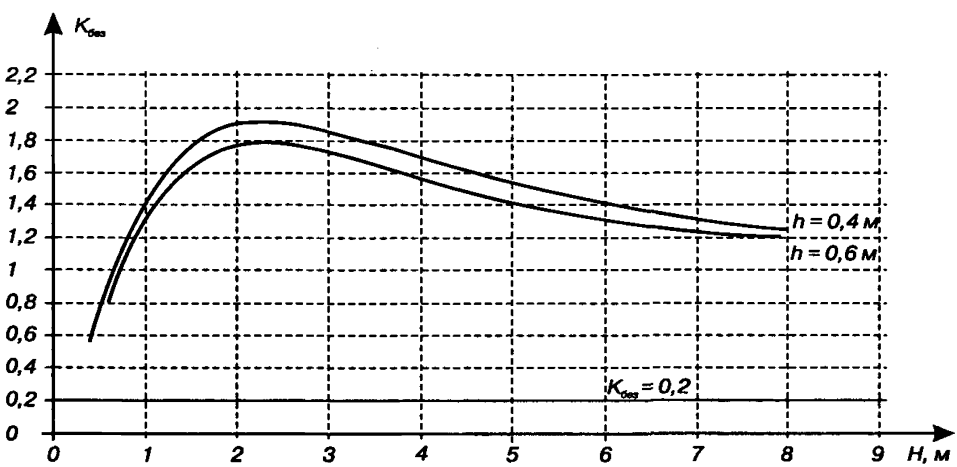


Рис. 4.2.4. Изменение $K_{без}$ суглинка текучепластичного в процессе послойной отсыпки насыпи высотой 8 м на ПК 9+50

сти наиболее слабых слоёв основания в процессе отсыпки насыпи с учётом пошагового улучшения сдвиговых характеристик.

Расчеты безопасной нагрузки и коэффициента $K_{без}$ с учётом улучшения прочностных характеристик проведены для всех вариантов технологических режимов при послойной отсыпке слоев насыпи и сведены в таблицы 4.2.3 - 4.2.6.

Таким образом, применение интенсивной технологии на ПК 5+17,77 и на ПК 9+50 позволяет улучшить деформационные (ε, Е) и прочностные (С, φ) характеристики грунтов основания. При этом не происходит нарушение устойчивости слабого основания при отсыпки последних слоёв ($K_{без} \geq 1$). На основе расчётов рекомендуется в целях обеспечения безопасного режима возведения земляного полотна толщину отсыпки первых слоёв принимать 0,8 - 1,0 м.

Такой же вывод об эффективности применения интенсивной технологии сделан для ПК 4+71,77 и ПК 7+00 со следующими грунтами в основании: суглинок мягкопластичный и глина полутвёрдой консистенции.

Таблица 4.2.3

Результаты расчета $K_{без}$ для 1-го варианта уплотнения насыпи $H = 7,5$ м на ПК 5+17,77

Слой	Высота насыпи H, м	$K_{без1}$	$K_{без2}$	$K_{без3}$
1	0,4	0,9	0,53	0,94
2	0,8	1,98	1,08	1,69
3	1,2	2,65	1,41	2,11
4	1,6	3,01	1,56	2,3
5	2	3,16	1,6	2,4
6	2,4	3,19	1,58	2,41
7	2,8	3,15	1,53	2,37
8	3,2	3,09	1,46	2,32
9	3,6	3,03	1,4	2,27
10	4	2,97	1,33	2,22
11	4,4	2,92	1,27	2,18
12	4,8	2,89	1,21	2,15
13	5,2	2,87	1,15	2,13
14	5,6	2,87	1,11	2,12
15	6	2,88	1,18	2,12
16	6,4	2,91	1,13	2,14
17	6,8	2,96	1,09	2,17
18	7,2	2,86	1,05	2,21
19	7,5	2,76	1,05	2,29

Таблица 4.2.4

Результаты расчета $K_{бо}$ для 2-го варианта уплотнения насыпи $H = 7{,}5$ м на ПК 5+17,77

Слой	Высота насыпи H, м	$K_{бо1}$	$K_{бо2}$	$K_{бо3}$
1	0,6	1,14	0,67	1,19
2	1,2	2,17	1,21	1,92
3	1,8	2,62	1,41	2,17
4	2,4	2,72	1,43	2,09
5	3	2,68	1,38	2,04
6	3,6	2,58	1,32	1,96
7	4,2	2,48	1,23	1,87
8	4,8	2,39	1,15	1,79
9	5,4	2,31	1,18	1,73
10	6	2,26	1,1	1,69
11	6,6	2,23	1,1	1,66
12	7,5	2,16	1,03	1,6

Таблица 4.2.5

Результаты расчета $K_{бо}$ для 1-го варианта уплотнения насыпи $H = 8$ м на ПК 9+50

Слой	Высота насыпи H, м	$K_{бо1}$	$K_{бо2}$	$K_{бо3}$
1	0,4	3,51	0,56	0,9
2	0,8	6,25	1,19	1,75
3	1,2	7,96	1,59	2,25
4	1,6	8,78	1,81	2,51
5	2	8,99	1,91	2,59
6	2,4	8,84	1,92	2,56
7	2,8	8,51	1,88	2,48
8	3,2	8,09	1,82	2,38
8	3,6	7,65	1,76	2,26
10	4	7,21	1,69	2,15
11	4,4	6,79	1,65	2,04
12	4,8	6,4	1,58	1,93
13	5,2	6,04	1,52	1,84
14	5,6	5,71	1,47	1,75
15	6	5,41	1,42	1,67
16	6,4	5,13	1,37	1,6
17	6,8	4,88	1,33	1,53
18	7,2	4,65	1,3	1,47
19	7,6	4,43	1,27	1,42
20	8	4,24	1,25	1,37

Таблица 4.2.6

Результаты расчета $K_{без}$ для 2-го варианта уплотнения насыпи $H = 8$ м на ПК 9+50

Слой	Высота насыпи H, м	$K_{без1}$	$K_{без2}$	$K_{без3}$
1	0,6	5,04	0,8	1,29
2	1,2	8,06	1,47	2,23
3	1,8	9,09	1,74	2,54
4	2,4	9	1,79	2,54
5	3	8,47	1,73	2,41
6	3,6	7,79	1,64	2,24
7	4,2	7,13	1,54	2,06
8	4,8	6,52	1,45	1,91
9	5,4	5,98	1,36	1,76
10	6	5,51	1,31	1,64
11	6,6	5,1	1,28	1,53
12	7,2	4,73	1,22	1,43
13	8	4,32	1,2	1,32

Как показали расчёты на поперечниках ПК 5+00; ПК 5+17,17; ПК 8+36а; ПК 13+00; ПК 18+00; ПК 19+50; ПК 24+00 при отсыпке первых и последних слоёв Кбез < 1, в связи с чем на этих участках для применения интенсивной технологии необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия, например, армирование геосинтетическим материалом (и на основании расчётов - их сочетание).

5. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ НАСЫПИ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

Устойчивость насыпи определяется по методике круглоцилиндрических поверхностей скольжения (КЦПС) [6] с дополнительным пошаговым учётом параметров строительной нагрузки $P_к$.

В качестве исходных данных принимаются следующие параметры:

- геометрические размеры насыпи (высота, ширина поверху);
- строительная нагрузка;
- показатели крутизны откосов - m;
- плотность грунта насыпи $\gamma_н$;
- плотность грунта основания γ;
- углы внутреннего трения грунтов насыпи и основания φ;
- удельные сцепления грунтов насыпи и основания C;
- мощность слоёв грунта слабого основания h_i.

Для расчетов устойчивости поперечное сечение насыпи разбивают на блоки (рис.5.1).

Устойчивость насыпи оценивают коэффициентом устойчивости $K_{уст}$. Коэффициент устойчивости каждого блока, смещение которого возможно по поверхности круглого цилиндра, определяется как отношение суммы моментов сил, удерживающих блоки отсыпанной части насыпи от вращения относительно оси, проходящей через точку O, к сумме моментов сдвигающих сил относительно той же оси. При этом внешние силы раскладывают на составляющие, нормальные и тангенциальные к поверхности скольжения:

$$K_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} M_{удерж}}{\sum_{i=1}^{i=n} M_{сдвиг}}. \qquad (18)$$

В блоках, расположенных левее вертикально направленного радиуса кривой смещения, возникают тангенциальные составляющие веса блока $T_к$, которые направлены в сторону, противоположную смещению грунта.

Таким образом, часть тангенциальных составляющих веса отсеков относится к удерживающим силам $T_{уд}$, другая часть - к

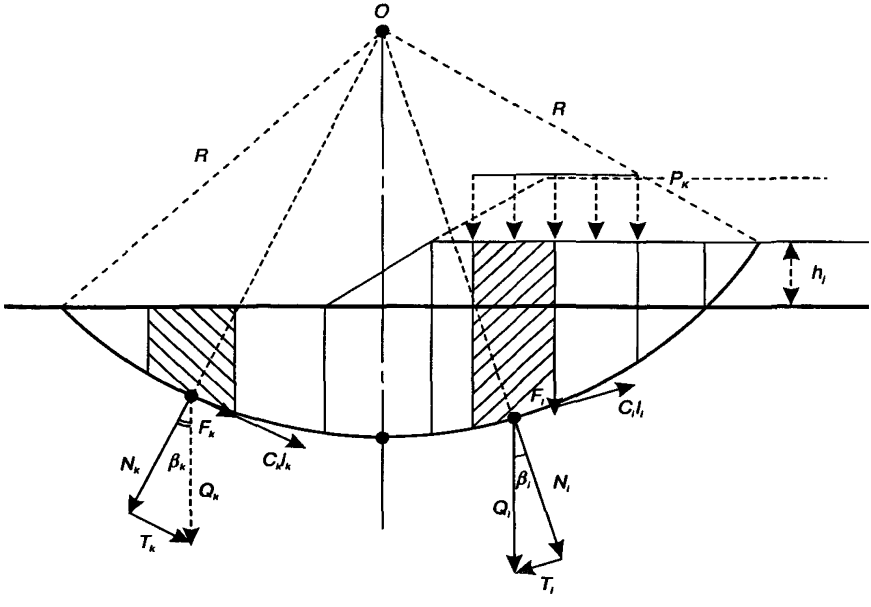


Рис. 5.1. Схема разбивки на блоки поперечного сечения насыпи и основания

сдвигающим силам $T_{сдв}$. Формула коэффициента устойчивости грунтового массива на каждом шаге отсыпки насыпи принимает вид:

$$K_{уст}=\frac{\sum N tg\,\varphi+\sum C_i l_i+\sum T_{уд-i}}{\sum T_{сдв-i}}, \qquad (19)$$

$$N_i = \gamma_i\,\omega_i \cos\beta_i, \qquad (20)$$

$$T_{сдв-i} = (\gamma_i\,\omega_i + P_K)\sin\beta_i, \qquad (21)$$

где N_i - сила трения, возникающая в i-м блоке;

$C_i\,l_i$ - сила сцепления i-го блока с поверхностью скольжения;

$T_{уд-i}$ - удерживающая сила, действующая на i-й блок;

$T_{сдв-i}$ - сдвигающая сила, действующая на i-й блок, с учётом нагрузки от катка $P_к$;

γ_i - удельный вес i-го блока;

ω_i - площадь i-го блока;

β_i - угол наклона поверхности скольжения к горизонту в пределах i-го блока;

φ - угол внутреннего трения грунта насыпи;

C - удельное сцепление грунта насыпи.

Для оценки устойчивости имеет значение критическая кривая смещения, т. е. такая кривая, при которой коэффициент устойчивости $K_{уст}$ имеет наименьшее значение.

Задача состоит в том, чтобы найти такое положение поверхности скольжения, при котором коэффициент устойчивости минимален после каждого отсыпанного слоя. Поиск коэффициента устойчивости сводится к решению оптимизационной задачи, параметрами которой являются координата точки вращения и радиус поверхности круглого цилиндра.

Координаты центра критической поверхности скольжения (X_0, Y_0) определяют по программам для ПЭВМ или по графику Ямбу (рис.5.2) в зависимости от величины λ и средней крутизны откосов m. В начале определяют безразмерные координаты x_0, y_0 критической поверхности скольжения. Абсолютные значения координат получают в пошаговом режиме путём умножения их безразмерных значений на высоту слоя отсыпки:

$$X_0 = x_0 H \tag{22}$$

$$Y_0 = y_0 H \tag{23}$$

$$\lambda = \frac{\gamma_w H \operatorname{tg} \varphi_w}{C_w}, \tag{24}$$

где γ_w - плотность грунта насыпи, т/м^3;
H - высота насыпи, м;
φ_w - угол внутреннего трения насыпного грунта, град.;
C_w - удельное сцепление грунта насыпи, т/м^2.

Параметры C и φ определяются в пошаговом режиме после отсыпки каждого слоя.

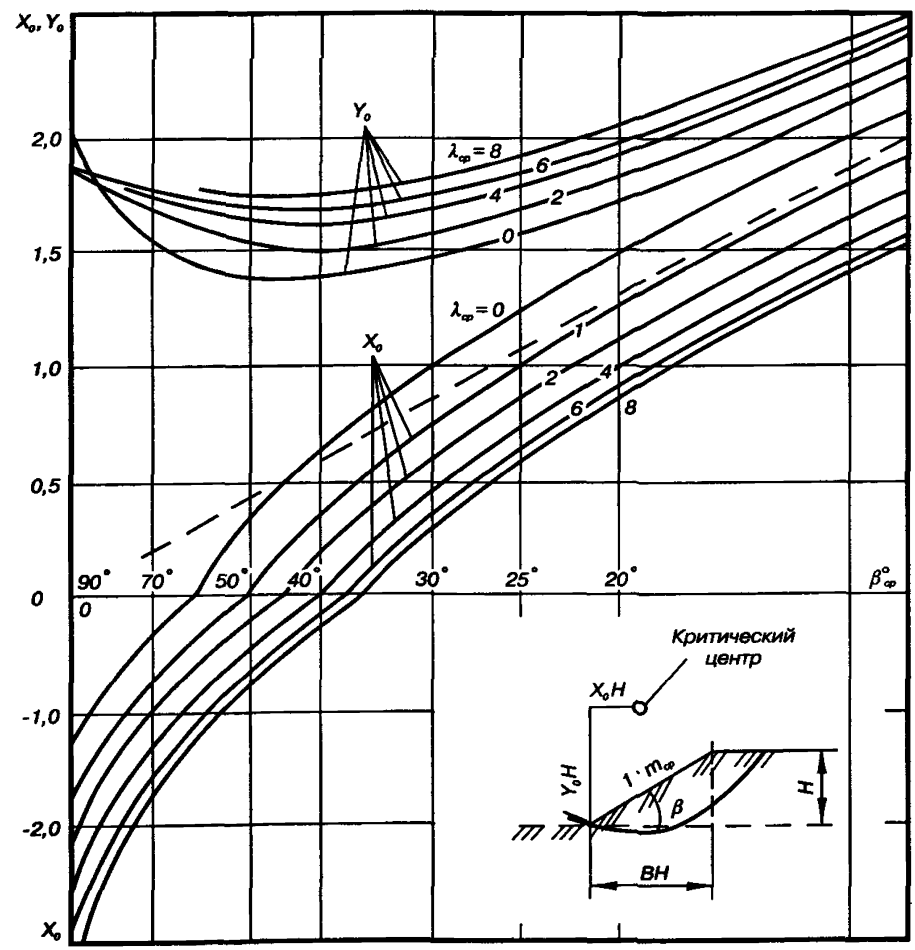


Рис. 5.2. График Ямбу

6. ВЫБОР ГЕОСИНТЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В сочетании с интенсивной технологией геосинтетический материал (ГСМ) позволяет улучшить структуру и прочность слабых грунтов в основании. Его применение позволяет эффективно влиять на параметры строительных нагрузок и влажность грунтов. Укладка ГСМ в основании насыпи необходима в целях увеличения устойчивости основания. В ходе интенсивного уплотнения возрастает поровое давление, в этом случае устройство геотектильной прослойки в основании позволяет под вибрационной нагрузкой от катка отжимать и отводить воду, тем самым, уменьшая влажность водонасыщенных грунтов. Геосинтетический материал позволяет снижать напряжения и способствует улучшению структуры уплотняемых грунтов [3].

При применении интенсивной технологии геосинтетический материал должен обладать следующими эксплуатационными характеристиками:

- относительное удлинение ГСМ под расчётной нагрузкой не должно превышать 80 %;
- материал в своей структуре должен иметь бесконечные нити, так как вибрационное уплотнение армирующего слоя может привести его к расползанию;
- фильтрационные свойства не должны уменьшаться при увеличении плотности материала;
- ГСМ должен иметь нежёсткое механическое закрепление нитей в процессе изготовления, чтобы обеспечивались его дренажные свойства во всех направлениях.

На всём участке строительства рекомендуется укладывать геотекстиль, который должен обладать высокой прочностью, с большим армирующим эффектом; высокими водопроводящими свойствами в плоскости материала; иметь повышенное сопротивление против повреждений в процессе строительства.

Наиболее распространенные виды геосинтетических материалов ведущих фирм-производителей (Bonar, Polyfelt, Tenax, Geolon, Huesker Synthetis и др.) имеют следующие свойства:

- **Bonar HS** - высокопрочный тканый геотекстиль из полипропилена (рис. 6.1), обладающий водопроводящими свойствами и устойчивостью против повреждений. Основные разновидности этого тканого материала со всеми техническими характеристиками приведены в табл. 6.1.

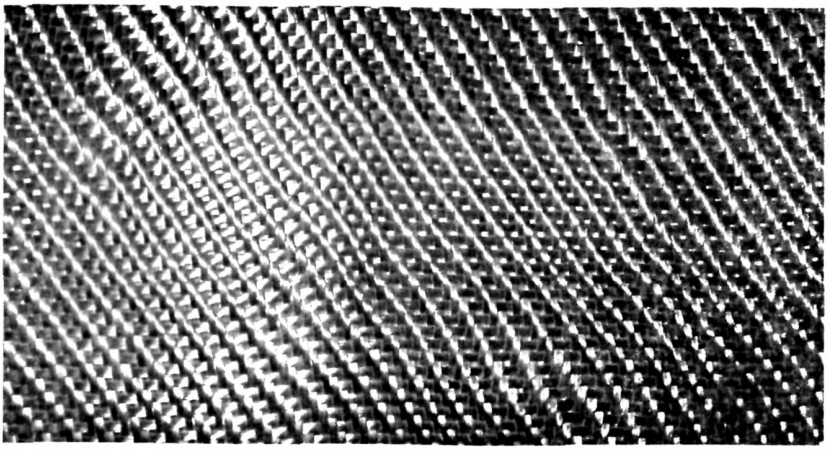


Рис. 6.1. Высокопрочный тканный геотекстиль Bonar HS

Таблица 6.1

Технические характеристики тканного геотекстиля *Bonar*

Характеристики материала	HS 100/50	HS 100/70	HS 150/50	HS 200/50	HS 300/50	HS 400/50	HS 600/100
Прочность на растяжение, кН/м:							
в продольном направлении	110	110	157	205	300	438	580
в поперечном направлении	58	80	59	57	50	60	105
Прочность при удлинении, кН/м:							
6 %	50	50	75	100	-	200	354
10 %	100	75	150	200	-	400	600
Относительное удлинение при разрыве, %							
в поперечном направлении	12	11	12	12	20	12	10
Прочность на разрыв CBR, Н	6000	7000	7200	7300	-	8700	-
Водопроницаемость, м/с	$45x10^{-3}$	$11x10^{-3}$	$38x10^{-3}$	$20x10^{-3}$	-	$10x10^{-3}$	$7x10^{-3}$
Толщина при давлении 2 кПа, мм	-	-	0,7	0,93	1,33	1,83	2,3
Плотность, г/м^2	285	275	383	481	690	862	1300

• **Rock PEC** - высокопрочный армирующий геотекстиль (рис. 6.2), обладающий водопроводящими свойствами и устойчивостью против повреждений. Этот геотекстиль совмещает функцию армирующей геосетки с дренирующими возможностями. Основные разновидности этого нетканого материала со всеми строительными характеристиками приведены в табл. 6.2;

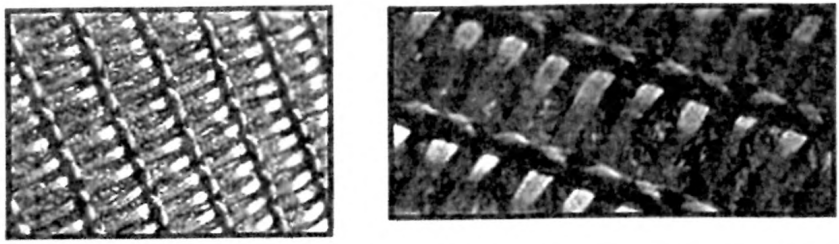


Рис. 6.2. Армирующий материал с высоким пределом прочности Полифелт Rock PEC

Таблица 6.2

Технические характеристики армирующего геотекстиля

Характеристики	PEC 35	PEC 50	PEC 75	PEC 100	PEC 150	PEC 200	PEC 35/35	PEC 50/50	PEC 75/75	PEC 100/100
Направление армирования	Однонаправлено					Двунаправлено				
Предел на растяжение, кН/м: продольное поперечное (ИСО 10319)	35 4	50 4	75 14	100 14	150 14	200 14	35 35	50 50	75 75	100 100
Максимальное удлинение,%: продольное поперечное (ИСО 10319)	13 60	13 60	13 60	13 60	13 60	13 60	13 13	13 13	13 13	13 13
Прочность на растяжение, кН/м: при 2% при 3% при 5% (ИСО 10319)	6 8,5 15	7,5 11 22	12 17 30	14 19 33	22 31 51	30 45 72	6 8,5 15	7,5 11 22	12 17 30	14 19 33
Водопроницаемость, 10^{-3} м/с: перпендикулярно плоскости материала 2 kPa [Е ДИН 60500/4]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0
в плоскости материала 20 kpa [ИСО 12958]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Толщина, мм [ЕН 964-1]	1,9	2,1	2,3	2,4	2,8	2,9	2,4	2,6	2,8	3,0
Масса, г/м² [ЕН 965]	280	310	340	370	450	540	330	370	450	540

• **Полифелт F** - двухсторонний геотекстиль из бесконечных нитей (рис.6.3). Один слой - фильтр, другой - механическая защита фильтра. Эта конструкция уменьшает риск повреждения и заиления, при одновременно высокой водопроницаемости. Технические характеристики приведены в табл.6.3.

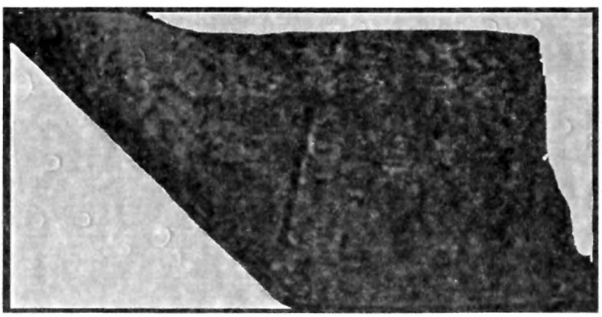


Рис. 6.3. Двухсторонний геотекстиль из бесконечных нитей Полифелт F

Таблица 6.3

Технические характеристики двухстороннего геотекстиля из механически упрочненных нитей

Свойства (Нормы испытаний)	F 60	F 70	F 80
Количество перетяжек	25	35	40
Эффективный диаметр отверстий Q_{90}, мм (ЕН ИСО 12956)	0,08	0,08	0,08
Водопроницаемость в плоскости, 10^{-3} м^2/с:			
2 kPa	2,5	1,8	1,5
20 kPa	2,5	1,6	1,3
Прочность на растяжение, кН/м, вдоль/поперек	23/23	30/30	35/35
Удлинение при максимальном растяжении, %, вдоль/поперек (ЕН ИСО 10319)	85/85	85/85	85/85
Удельная работа деформации, Дж/м (ЕН ИСО 10319)	10000	13000	15000
Усилие сжатия, кН (ЕН ИСО 12236)	3,3	4,5	6,5
Толщина, мм при 2 kPa (ЕН 964-1)	3,5	5,0	6,5
Толщина, мм при 2 kPa (ЕН 964-1)	3,5	5,0	6,5
Масса, г/м^2 (ЕН 965)	400	600	800

• **Geolon PP** - тканый геотекстиль (рис. 6.4), изготовленный из полипропиленовых лент, применяется для армирования грунтов основания (рис. 6.5) и разделения грунтовых слоев. Материал обладает высокой прочностью при малом удлинении, устойчивостью к механическим повреждениям, отличается хорошими контактными характеристиками с грунтом. Ширина материала 5,2 м. Geolon PP является химически инертным к щелочам и кислотам и сохраняет свою прочность в агрессивной среде (табл. 6.4).

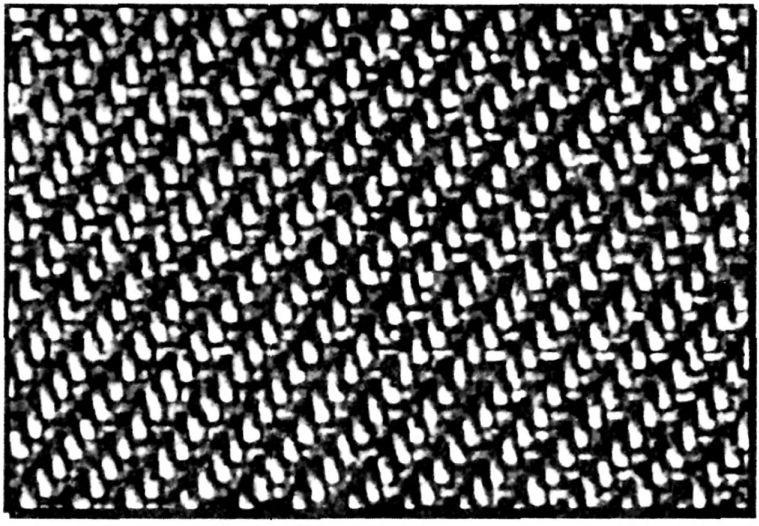


Рис. 6.4. Геотекстиль Geolon PP

Таблица 6.4

Технические характеристики Geolon

Механические характеристики	PP 15	PP 25	PP 40	PP 60	PP 80	PP 100 s	PP 120	PP 120 s	PP 200	PP 200 s	PP 300	PP 500
Продольное направление (ЕН ИСО 10319):												
Предел прочности на разрыв, кН/м	15	25	40	60	80	100	120	120	200	200	300	500
Удлинение при максимальной нагрузке, %	20	15	14	8	11	12	12	14	11	14	12	10
Нагрузка при 10% удлинении, кН/м	10	17	30	-	75	85	100	100	160	150	230	-

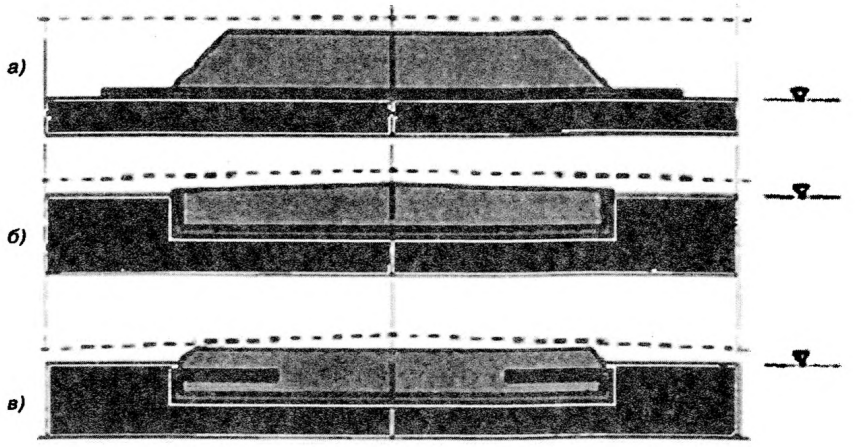


Рис. 6.5. Схемы армирования слабого основания

Окончание таблицы 6.4

Механические характеристики	PP 15	PP 25	PP 40	PP 60	PP 80	PP 100 s	PP 120	PP 120 s	PP 200	PP 200 s	PP 300	PP 500
Нагрузка при 5% удлинении, кН/м	6	8	13	40	40	45	60	55	80	50	110	400
Поперечное направление (ЕН ИСО 10319):												
Предел прочности на разрыв, кН/м	15	25	40	60	80	100	40	120	40	200	40	50
Удлинение при максимальной нагрузке, %	11	13	7	8	11	8	7	7	7	13	7	9
Гидравлические и фильтрационные характеристики												
Расход воды, л/м^2 с при Δh = 100 мм (НЕН 5167)	16	10	25	35	20	15	30	15	10	25	15	25
Водяной столб, мм при v = 10 мм/с (НЕН 5167)	100	75	25	15	29	45	17	29	100	20	40	33
Эффективный размер пор Q_{90}, мкр (НЕН 5168)	175	180	290	400	250	250	500	250	350	500	300	300
Физические характеристики												
Масса на единицу площади, г/м^2 (ЕН 965)	100	110	180	230	360	360	360	500	530	940	700	1200
Толщина, мм при нагрузке 2 кН/м^2 (ЕН 964-1)	0,50	0,50	0,80	1,10	1,10	1,20	1,30	1,70	2,00	3,30	2,60	3,20

• **СТАБИЛЕНКА (STABILENKA)** - полиэфирная ткань, обладающая, благодаря специальной технологии, высоким начальным модулем упругости и хорошими фильтрующими свойствами. Геотекстиль выпускается девяти типов с различной прочностью на раздир, толщиной волокон и типом плетения.

Характеристики материала:

Масса, г/м² .....365 - 1960

Прочность на раздир в продольном направлении, кН/м .....150 - 1000

Прочность на раздир в поперечном направлении, кН/м .....45 - 100

Водопроницаемость при водном столбе в 100 мм, л/см² .....2 - 25

Применяется для укрепления откосов и слабых грунтов, служащих основанием для строительства дорог, аэродромов, дамб, волнорезов. Может быть использована в качестве армирующей прослойки под изолирующими слоями свалок промышленных и бытовых отходов.

Водопроницаемость ГСМ должна быть выше водопроницаемости грунта верхнего слоя основания. Одна из возможных схем устройства прослойки ГСМ в основании приведена на рис. 6.6.

При проектировании и строительстве насыпи на слабом основании, армированном геосинтетическим материалом, должна быть решена следующая задача [3;5].

Накопленную величину дефицита удерживающих сил (разность между удерживающими и сдвигающими силами в пределах каждого блока до горизонта укладки ГСМ), должна воспринимать прослойка из геосинтетического материала. Следовательно формула для расчёта коэффициента устойчивости принимает вид:

$$K_{уст}=\frac{\sum N_i tg\,\varphi_i + \sum C_i l_i + \sum T_{уд}}{\sum T_{сдв} - R_p}. \qquad (25)$$

Расчётная прочность армоэлемента (геосинтетической прослойки) R_p, определяется по формуле:

$$R_p \geq \frac{T_{max} \cdot K_b}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3}, \qquad (26)$$

где T_{max} - максимальная нагрузка, воспринимаемая ГСМ, соответствующая величине накопленного дефицита удер-

живающих сил на горизонте предполагаемого расположения армоэлемента;

K_b - коэффициент запаса для гибких армоэлементов, принимаемый равным 1,1 ÷ 1,75;

A_1 - коэффициент учета ползучести, принимают равным 0,5 ÷ 0,8;

A_2 - коэффициент учёта стыковки, взаимного перекрытия и соединения полотен ГСМ, принимают 0,8;

A_3 - коэффициент учёта влияния природных факторов, принимаемый равным 0,9.

Для повышения устойчивости насыпи на слабом основании рекомендуется соблюдение следующих условий [5;8]:

- геосинтетический материал укладывается на выравнивающий слой из песка;
- угол внутреннего трения песка для нижнего слоя насыпи и выравнивающего слоя должен быть не менее 30°;
- коэффициент трения ГСМ по песку должен составлять не менее 0,85 ÷ 0,9 от коэффициента трения песка.

Пример выбора ГСМ для укладки в основании автодорожной насыпи H = 8 м на подходах к мостовому переходу через р. Каму на ПК 9+50 (см. пример 2 на с. 21).

Технологическое давление на прослойку ГСМ определяется по формуле:

$$P_{ГСМ} \geq P_н \tag{27}$$

где $P_н$ - наибольшее давление от действия катка и веса осыпанного грунта;

$$P_н = P_{гр} + P_{kl} \tag{28}$$

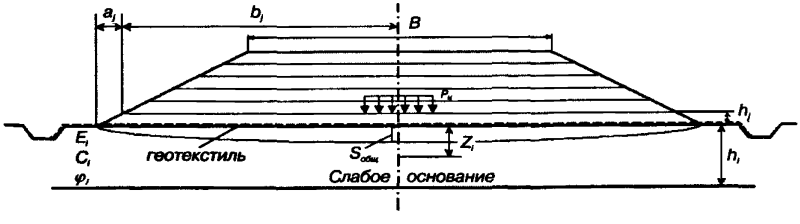


Рис. 6.6. Схема укладки геотекстиля в основании

Расчётами (п. 3.2) установлено, что наибольшее давление на грунт основания возникает при отсыпке первых и последних слоев во всех режимах уплотнения земляного полотна. Самое большое давление возникает в первом режиме при отсыпке первого слоя $P_н$ = 18,4 кПа, которое удовлетворяет условию (27).

$$P_{ГСМ} = 20\ кПа \geq P_н = 18{,}4\ кПа$$

Применительно к примеру 2 возведения земляного полотна Н = 8 м для укладки в основание подбирают ГСМ, выдерживающий данное технологическое давление и обладающий по возможности большой водопропускной способностью как вдоль, так и поперёк волокон. Например, для устройства насыпи можно выбрать: геотекстиль фирмы Bonar HS 150/50 и Polyfelt Rock PEC 150, а также Huesker Stabilenka 150/50.

7. ПРОГНОЗ ВО ВРЕМЕНИ ОСАДКИ НАСЫПИ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

7.1. Методика расчётов

Для прогноза скорости прохождения осадки слоёв слабых грунтов необходимо определить консолидационные характеристики, которые могут быть получены по классификационным таблицам или по результатам испытаний образцов, взятых из слабых слоёв [5].

Испытания на консолидацию могут быть выполнены при одинаковом пути фильтрации на нескольких образцах разной высоты или при различных путях фильтрации идентичных образцов.

Один из образцов нагружают заданной степенью нагрузки и ведут замеры деформации через определённые промежутки времени. Результаты измерений заносят в журнал и строят графическую зависимость полулогарифмического вида $\lambda = F(lg\ t)$. Для сокращения времени испытания опыт может быть закончен, когда экспериментальные точки кривой $\lambda = F(lg\ t)$ укладываются на прямую.

Для прогноза осадки во времени целесообразнее использовать степенную зависимость Н.Н. Маслова [1], которая учитывает фильтрационные свойства и ползучесть скелета грунта:

$$T_u = t_u\left(\frac{H_ф}{h_ф}\right)^n, \qquad (29)$$

где T_u - время завершения заданной степени консолидации слоя;

t_u - время достижения заданной степени консолидации образца, мин;

$H_ф$ - путь фильтрации воды из расчётного слоя, см;

$h_ф$ - путь фильтрации воды из образца, см;

n - показатель консолидации, определяется по графику (рис.7.1.1) в зависимости от числа пластичности и консистенции грунта или по результатам испытаний образцов с разными условиями фильтрации [1]:

$$n = \frac{lg\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{lg\left(\frac{h_2}{h_1}\right)}, \qquad (30)$$

где t_1 и t_2 - время, в течение которого достигается заданное уплотнение грунта в образцах с высотой соответственно h_1 и h_2.

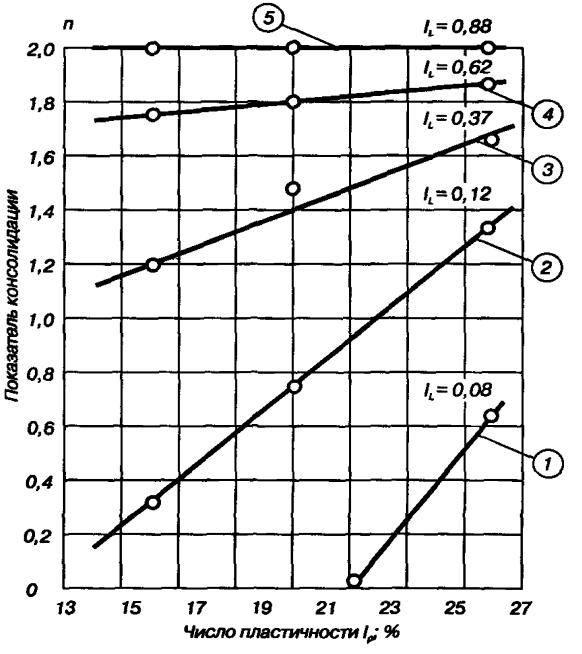


Рис. 7.1.1. Зависимость показателя консолидации n от числа пластичности грунта J_p и его консистенции J_L:

1 - твёрдая консистенция, *2* - полутвёрдая консистенция, *3* - тугопластичная консистенция, *4* - мягкопластичная консистенция, *5* - текучепластичная и текучая консистенция

Полученное время T_u сравнивается с проектными сроками строительства конкретного объекта, так как оно определяет технологический перерыв между окончанием возведения насыпи и устройством дорожной одежды.

Если T_u превышает допускаемые сроки, то назначаются дополнительные мероприятия для ускорения осадки насыпи (прорези, дрены, временная пригрузка и т.д.).

7.2. Пример расчёта времени прохождения осадки

Рассмотрим ход осадки применительно к примеру сооружения насыпи Н = 8 м (см. п.3.2.), срок 0,5 года.

В результате испытаний образцов текучепластичного суглинка на консолидацию ОАО "Уралгипротранс" были полученные кривые консолидации (рис.7.2.1 и рис.7.2.2).

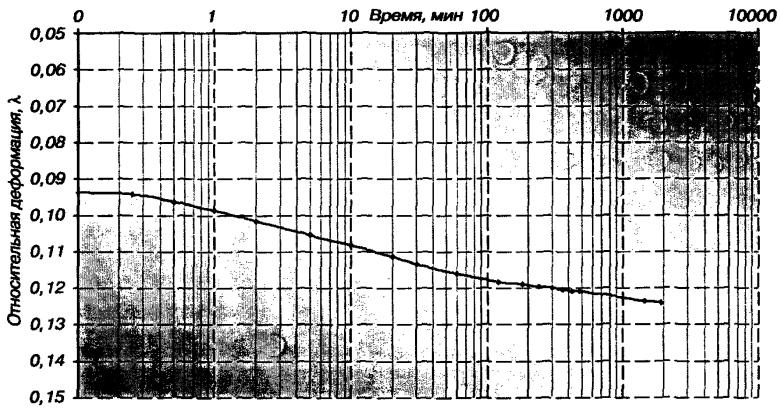


Рис. 7.2.1. Кривая консолидации текучепластичного суглинка при двухсторонней фильтрации под расчетной нагрузкой P= 0,2 МПа и $h_{обр}$ = 2,5 см

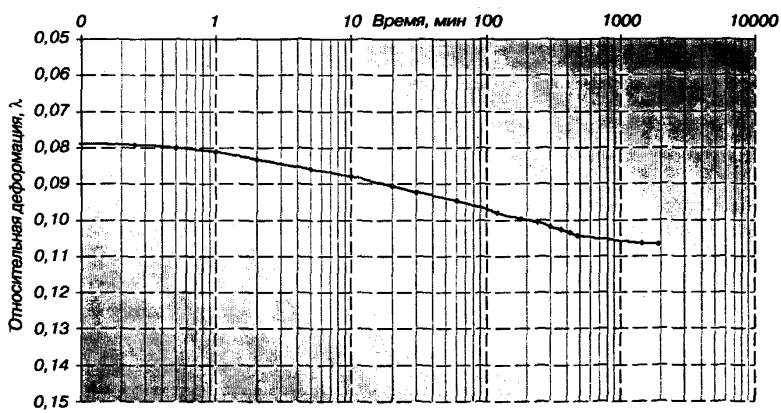


Рис. 7.2.2. Кривая консолидации текучепластичного суглинка при двухсторонней фильтрации под расчетной нагрузкой P = 0,2 МПа и $h_{обр}$ = 2,5 см

Анализ кривых показывает существенную (условно-мгновенную) осадку образцов. Это означает, что глинистые грунты имеют малопрочные структурные связи.

Определим консолидацию слабого основания на примере насыпи Н = 8м. Основание насыпи представлено суглинком различной консистенции, включая преобладающую толщу суглинка текучепластичной консистенции h = 2,3 м.

На кривых консолидации определяем время достижения 50% степени консолидации. Для этого вычисляют относительную деформацию λ_u=50%, соответствующую 50% первичному фильтрационному уплотнению, которая равна среднему арифметическому между деформациями, соответствующими нулевому и 100% уплотнению:

$$t'_u=50\% = 7{,}5 \text{ мин}; \; t''_u=50\% = 14 \text{ мин}$$

Для расчёта t_u=50% определим среднее значение времени достижения 50% степени консолидации по первой и второй кривым консолидации.

$$t^{ср}_{u=50\%}=\frac{t' + t''}{2} = \frac{7{,}5 + 14}{2} = 11 \text{ мин}.$$

Коэффициент фильтрационной консолидации рассчитывается по формуле:

$$C_{u=50\%}=\frac{N_{50} h_ф^2}{t}, \qquad (31)$$

где N - фактор времени при заданной степени консолидации, определяется по таблицам (приложение 3);

$h_ф$ - путь фильтрации воды из образца, см.

В нашем случае коэффициент фильтрационной консолидации при достижении 50% степени консолидации будет равен:

$$C_{u=50\%} = \frac{N_{50} h_ф^2}{t^{ср}_{u=50\%}} = \frac{0{,}197 \cdot \left(\frac{2{,}294}{2}\right)^2}{11} = 2{,}4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{мин}.$$

Время достижения 50% степени консолидации будет равно:

$$T_{u=50\%} = t_u \left(\frac{H_ф}{h_ф}\right)^n = 11 \cdot \left(\frac{400}{2{,}294/2}\right)^2 = 930 \text{ дней} = 2{,}5 \text{ года}$$

Поскольку время консолидации превышает требуемый срок строительства земляного полотна (T = 0,5 года), предложена конструкция насыпи с устройством в основании прорезей. Методика расчёта насыпи с прорезями в основании изложена в разделе 9.

8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ С УСТРОЙСТВОМ ДРЕНАЖА

Устройство дренажа в сочетании с интенсивными технологическими режимами возведения земляных сооружений способствует улучшению прочностных и деформационных характеристик грунтов слабого основания. Концепция такого взаимодействия состоит в том, чтобы с помощью дренажа регулировать влажность грунтов основания в том режиме, который является оптимальным для реализации интенсивной технологии.

Если врезка в водоупор не предусмотрена, то устроенный дренаж будет являться несовершенным. Для установления эффективности работы дренажа, помимо его гидравлических параметров, требуется произвести расчёты сроков осушения водонасыщенного основания и снижения влажности по сравнению с влажностью до осушения.

В случае несовершенного дренажа при значительной мощности водоносного слоя сроки осушения определяются по формуле:

$$T = \frac{m_0 L_b^2}{1{,}115 \cdot K_\phi} \cdot \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{H}\right), \qquad (32)$$

где m_0 - водоотдача;

J_0 - средний уклон кривой депрессии, определяется по табл. 8.1;

Таблица 8 1

Значения J_0 по данным [6] в зависимости от вида грунта

Наименование грунта	J_0
Крупнопесчаные	0,003 - 0,006
Песчаные	0,006 - 0,020
Супесчаные	0,020 - 0,050
Суглинки	0,050 - 0,100
Глины	0,100- 0,150
Тяжелые грунты	0,150- 0,200
Торфяные грунты	0,020- 0,120

Таблица 8.2

Осредненные значения K_ϕ в зависимости от вида грунта

Наименование грунтов	K_ϕ^o,м/сут
Плотная глина	0,09
Глина	0,09 - 0,12
Суглинок	0,12 - 0,22
Супесь	0,22 - 0,45
Песок	0,45- 0,55
Гравий	0,6- 0,9

f - положение кривой депрессии, определяется по формуле:

$$f = h_0 + J_0 L_м \tag{33}$$

При осушении грунта удаляется капиллярная вода, остаётся только плёночная.

В этом случае $m_0 = n_0$, где n_0 - активная пористость, определяется по формуле:

$$n_0 = \frac{e - W_м \rho_s}{1 + e}, \tag{34}$$

где e - коэффициент пористости грунта;

ρ_s - плотность грунта.

В соответствии с [6] наибольшее количество плёночной воды $W_м$, которую могут выдержать частицы грунта, выражается в долях веса сухого грунта ρ_d. Объём, занимаемый плёночной водой, отнесённый к объёму сухого грунта, равен $W_м\ \rho_d$. Формула (34) для расчёта n_0 примет вид:

$$n_0 = n - W_м \rho_d, \tag{35}$$

$$e = \frac{n}{100 - n}, \tag{36}$$

$$\rho_d = \rho_{ск} = \frac{(e + 1)\,\rho_г}{1 + \frac{W}{100}}. \tag{37}$$

Коэффициент фильтрации $K_ф$ используется при расчётах скорости уплотнения грунтов под нагрузкой. Значения $K_ф$ для различных грунтов по данным [6], приведены в табл. 8.2.

Расчёт изменения влажности в осушенном грунте по сравнению с влажностью до осушения производится по формуле [6]:

$$\Delta W = n \frac{\upsilon_в}{\rho_{ск}} - W_М, \tag{38}$$

где $V_в$ - плотность воды, т/м^3.

Степень влажности при заданной влажности грунта W:

$$G = \frac{\rho_{ск} W}{\upsilon_в e}. \tag{39}$$

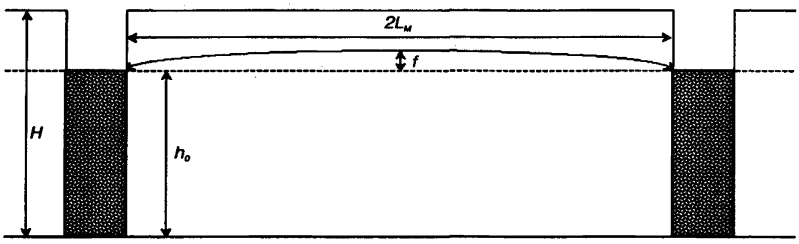


Рис. 8.1. Расчётная схема осушения дренажа

При снижении влажности на ΔW её новое значение равно:

$$W_{ул} = W - \Delta W \qquad (40)$$

Рассмотрим изложенную выше методику расчёта на примере устройства дренажа на участке железнодорожной линии Карпогоры - Вендинга (рис. 8.1).

Исходные данные: $L_M = 10{,}6$ м; $H = 6{,}6$ м; $h_0 = 0{,}6$ м; $n = 38$ %; $W = 22$ %, $W_M = 0{,}1$

Определим приближённо положение кривой депрессии:

$$f = 0{,}6 + 0{,}050 \cdot 10{,}6 = 1{,}13 \text{ м}$$

Затем найдём значение водоотдачи:

$$e = \frac{38}{100\text{-}38} = 0{,}61$$

$$\rho_d = \rho_{ск} = \frac{(0{,}61 + 1) \cdot 1{,}3}{1 + \frac{22}{100}} = 1{,}71 \ т/м^3$$

$$m_0 = n_0 = 0{,}38 - 0{,}10 \cdot 1{,}71 = 0{,}21$$

Определим снижение влажности в осушенном грунте:

$$\Delta W = 0{,}38 \cdot \frac{1}{1{,}71} - 0{,}1 = 0{,}12$$

Степень влажности при влажности грунта 22 % равна:

$$G = \frac{1{,}71 \cdot 0{,}22}{1 \cdot 0{,}61} = 0{,}6$$

При снижении влажности на 12%, искомая влажность будет равна:

$$W_{ул} = W - \Delta W = 22\text{-}12 = 10\ \%$$

Степень влажности при $W_{ул} = 10\ \%$ станет равной:

$$G = \frac{1{,}71 \cdot 0{,}10}{1 \cdot 0{,}61} = 0{,}3$$

Таким образом, устройство дренажа для осушения основания позволяет повысить эффективность интенсивных технологических режимов, тем самым, улучшая прочностные характеристики грунта основания. При меньшей степени влажности все прочностные характеристики грунтов основания выше, чем соответствующие прочностные характеристики при более высокой степени влажности.

9. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ С УСТРОЙСТВОМ ДРЕНАЖНЫХ ПРОРЕЗЕЙ В СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

Прорези устраиваются в слабых водонасыщенных грунтах в соответствии с [5] для ускорения консолидации основания за счет сокращения пути фильтрации воды, отжимаемой из слабой толщи (рис.9.1 и 9.2). Особенностью расчёта дренажных прорезей является необходимость учёта условий фильтрационной консолидации грунтов в пошаговом режиме под строительной нагрузкой.

Дренажные канавы (1) и прорези (2) целесообразно устраивать при мощности слабого слоя до 4 м и возможности сохранения в слабом грунте вертикальных откосов в течение времени, необходимого для заполнения каждой прорези дренирующим грунтом.

Расстояние l между дренажными прорезями в свету ориентировочно назначают исходя из фильтрационных свойств грунтов и проверяют расчётом в зависимости от заданного срока фильтрационной консолидации. Ширину прорезей $l_П$ назначают 1 - 1,2 м в зависимости от применяемого оборудования для устройства прорезей. Для заполнения прорезей следует использовать песок гравелистый с коэффициентом фильтрации $K_ф > 4$ м/сут, гравий и щебень.

При проектировании земляного полотна с прорезями расстояние между ними определяется расчётом, исходя из заданного срока достижения интенсивной части осадки слабого грунта.

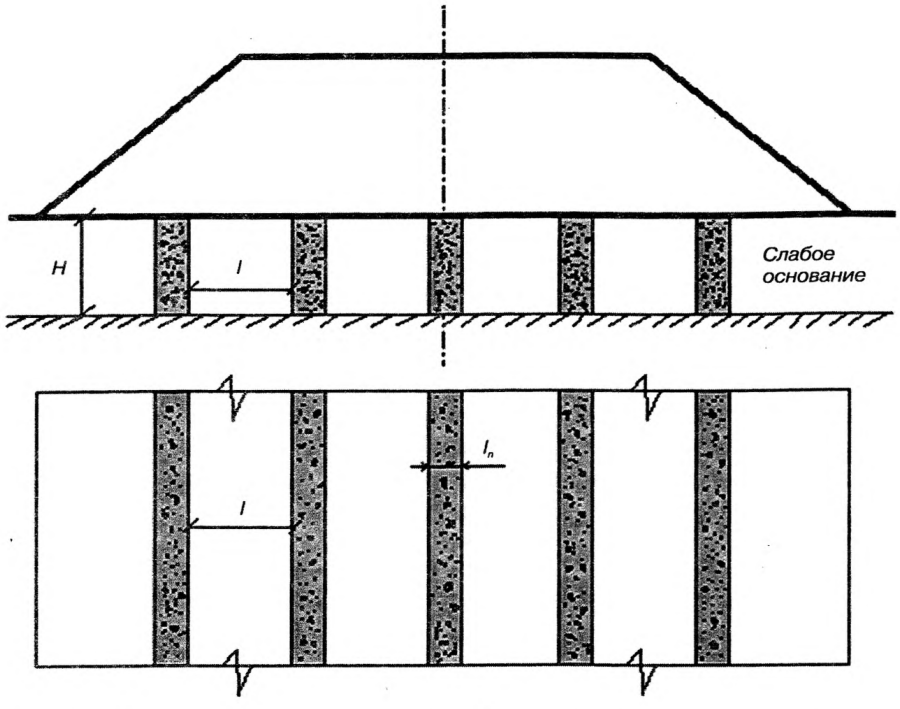


Рис. 9.1. Схема земляного полотна на слабом основании с продольными прорезями

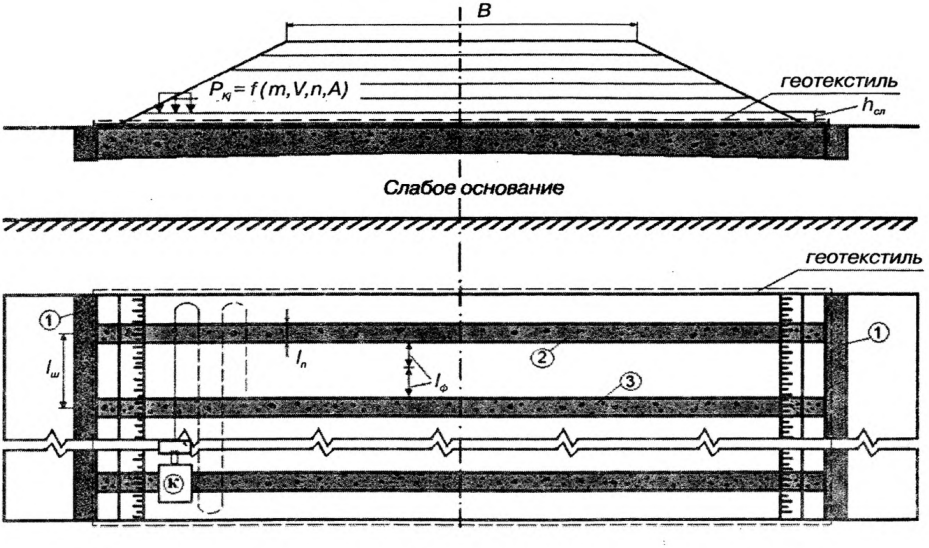


Рис. 9.2. Технологическая схема устройства поперечных прорезей в слабом основании

Для расчёта прорезей при использовании интенсивной технологии необходимы следующие данные: расчётные величины нагрузки (с учётом веса катка); расчётная мощность слабой толщи (с учётом условий фильтрации); конечная осадка слабого основания; результаты консолидационных и компрессионных испытаний грунтов слабой толщи.

Расчет слабого основания с прорезями заключается в определении общей степени консолидации основания:

$$U_{общ} = 100 - 0{,}01\,(100 - U_{гор})(100 - U_{верт}), \qquad (41)$$

где $U_{гор}$ - степень консолидации основания при горизонтальной фильтрации воды к прорезям;

$U_{верт}$ - степень консолидации основания при вертикальной фильтрации воды из основания.

Величины $U_{гор}$ и $U_{верт}$ устанавливают по графикам (рис.9.3 и 9.4). Для определения $U_{верт}$, рассчитывают величину фактора времени:

$$T_{верт} = \frac{C_{верт} T}{H_{ф}^{2}}, \qquad (42)$$

где $C_{верт}$ - коэффициент консолидации грунта при вертикальной фильтрации, определяющийся в условиях интенсивной технологии в пошаговом режиме с учётом переменной нагрузки $P_к$ и $P_{сл}$;

T - требуемый срок консолидации (из условий строительства);

$H_ф$ - расчётный путь вертикальной фильтрации.

Фактор времени, необходимый для определения $U_{гор}$, рассчитывают по формуле:

$$T_{гор} = \frac{C_{гор} T}{l^{2}}, \qquad (43)$$

где $C_{гор}$ - коэффициент консолидации грунта при горизонтальной фильтрации;

l - проектируемое расстояние между прорезями.

Если в результате расчётов получаем $U_{общ} < U_{треб}$, то следует повторить расчёт, уменьшив расстояние между прорезями.

Требуемая степень консолидации $U_{треб}$ регламентируется в документе [11]. В тех случаях, когда при требуемом сроке стро-

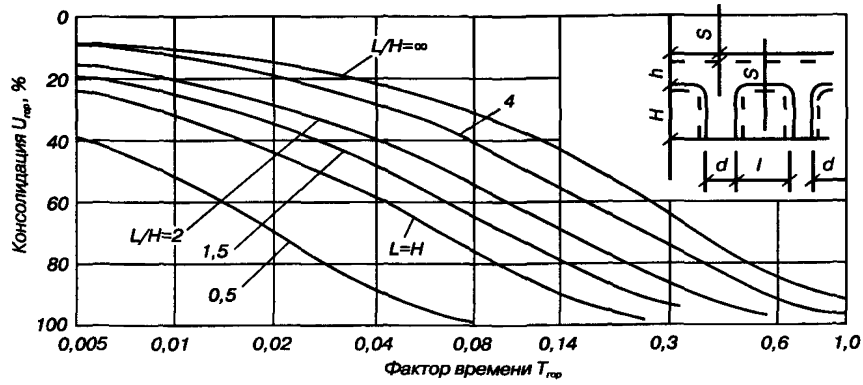


Рис. 9.3. График для определения степени консолидации в горизонтальном направлении [5]

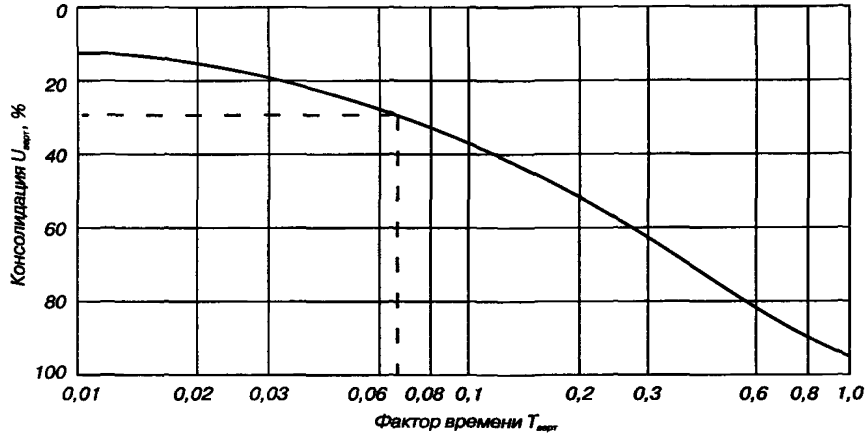


Рис. 9.4. График для определения степени консолидации в вертикальном направлении [5]

ительства не достигается требуемая степень консолидации слабого основания при рациональном расположении прорезей, рассчитываются варианты [5]:

- устройства вертикальных дрен (при h > 4 м);
- устройства временной пригрузки;
- предварительной консолидации основания.

Коэффициенты консолидации определяются по кривым консолидации, полученным при уплотнении под расчётной нагрузкой с учётом давления катка.

10. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ОСАДКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ

10.1. Песчаные сваи

Песчаные сваи устраивают для повышения несущей способности и снижения осадки слабых грунтов [5]. В грунтах, обладающих структурной прочностью, применение песчаных свай особенно эффективно. Работа песчаных свай заключается в восприятии ими части нормальных напряжений от веса насыпи за счёт бокового обжатия слабого грунта в межсвайном пространстве, а также в ускорении отжатия поровой воды. Сваи могут быть опёртыми и висячими. Висячие сваи устраиваются при большой мощности слабого слоя. Методика их расчёта (с учетом нагрузки от катка) зависит от назначения свай.

• Если сваи предназначаются для обеспечения прочности грунтов основания насыпи, то расчётом определяется минимальная величина сближения свай m, при которой соблюдается условие: коэффициент запаса $K_{доп} \geq 1$.

• Если сваи предназначены ещё и для ускорения и уменьшения осадки основания, то дополнительно расчётом подбирается межсвайное расстояние, обеспечивающее достижение заданной интенсивности и величины осадки (сваи-дрены).

Методика расчёта свайной конструкции дана в [5].

10.2. Вертикальные дрены

Дрены устраиваются в слабых грунтах с целью ускорения их консолидации за счёт сокращения пути фильтрации отжимаемой воды из слабой толщи при обеспеченной устойчивости [5].

Вертикальные дрены (рис. 10.2.1) эффективны в органических и минеральных грунтах мощностью не менее 4 м. Эффективность дрен повышается в случаях, когда дренируемая толща имеет более высокую горизонтальную водопроницаемость.

Устройство дрен следует совмещать с временной пригрузкой, обеспечивающей необходимый градиент отжатия поровой воды из грунта.

В качестве временной пригрузки могут служить каток и (или) пригрузочный слой.

Толщину пригрузочного слоя, при условии устойчивости основания, определяют по требованиям создания напора поровой воды, величина которого должна быть выше начального гради-

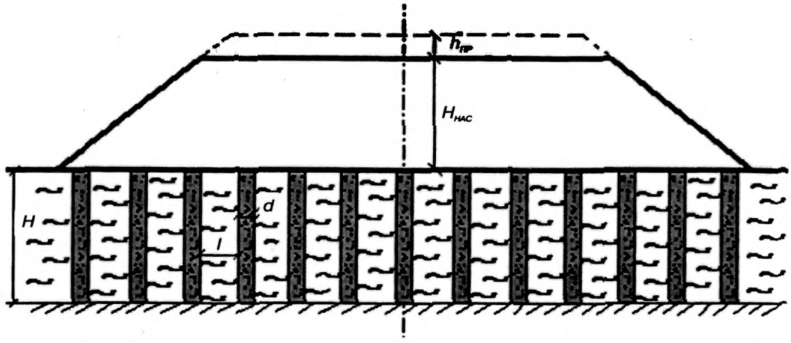


Рис. 10.2.1. Схема земляного полотна с вертикальными дренами на слабом основании

ента фильтрации грунта, если грунт таковым обладает, по формуле [5] (с учетом строительной нагрузки):

$$P_K + \gamma_{пр}\, h_{пр} > 0{,}5\; D\, \gamma_в\, I_0 - P_{расч} \qquad (44)$$

где D - эффективный диаметр дренирования, принимается равным расстоянию между дренами, м;

$\gamma_в$ - удельный вес воды в порах грунта, т/м^3;

I_0 - начальный градиент фильтрации грунта с учётом уплотнения под весом насыпи;

$P_{расч}$ - нагрузка в основании от насыпи проектного профиля, т/м^2;

$\gamma_{пр}$ - удельный вес грунта, используемого для пригрузки, т/м^3;

$P_к$ - нагрузка от катка, т/м^2.

Вертикальные дрены выполняются в виде скважин, заполняемых песком. Диаметр скважин может быть принят 400 - 600 мм, в зависимости от применяемого оборудования. Эффективность вертикальных дрен значительно повышается при добавке к материалу заполнения до 18% по массе извести. В зависимости от водопроницаемости грунта и требуемого срока завершения интенсивной части осадки расстояние между дренами изменяется от 2 м до 5 м.

Расчёт основания с вертикальными дренами осуществляется по методике, изложенной в [5]. Она аналогична расчёту основа-

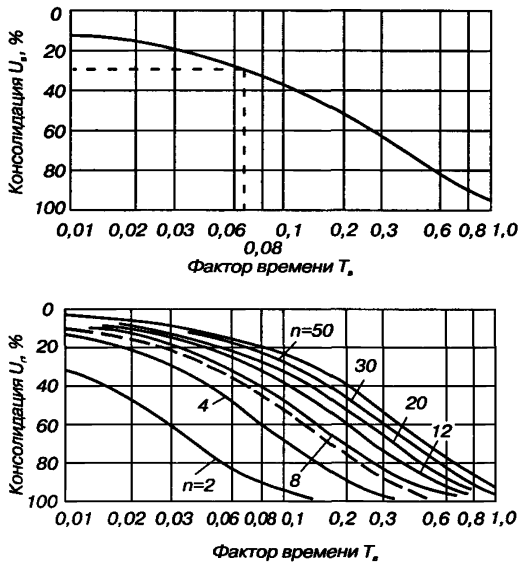


Рис. 10.2.2. Графики для определения степени консолидации грунта основания с вертикальными дренами

ния с дренажными прорезями, изложенному в п.9.

При расчёте дрен величины степени консолидации при вертикальной фильтрации воды из основания $U_в$ и при горизонтальной $U_г$ определяются по графикам (рис. 10.2.2).

Если при назначенном расстоянии между дренами не может быть достигнуто требуемое сокращение срока консолидации, то шаг дрен уменьшают и расчёт повторяют.

10.3. Пригрузочные бермы

Боковые пригрузочные бермы устраивают для обеспечения несущей способности слабого основания при наличии достаточной полосы отвода и небольшом расстоянии транспортировки грунта для их возведения.

Ширина берм должна быть не менее 4 м, а поверхность берм должна иметь поперечный уклон 20 - 30 ‰.

При проектировании боковых берм расчётом [5] определяют их высоту $h_{пр\,б.}$ и ширину $l_{пр.б}$, исходя из допустимой нагрузки на слабое основание (с учетом нагрузки от катка).

Величина допускаемой нагрузки для слабых грунтов, угол внутреннего трения которых 5 - 7°, рассчитывается по формуле:

$$P_{доп}=2b\rho_{ср}tg\,\varphi\left[\frac{\pi}{ctg\varphi-\frac{\pi}{2}+\varphi}\right]+\frac{\pi C}{tg\,\varphi\;(ctg\varphi-\frac{\pi}{2}+\varphi)}, \quad (45)$$

где $2b$ - ширина насыпи по средней линии, м;

$\rho_{ср}$ - средневзвешенный удельный вес грунта слабого основания, т/м^3;

C - удельное сцепление, т/м^2.

Высота пригрузочных берм:

$$h_{пр.б.} = \frac{P_{доп}}{\gamma_б}, \tag{46}$$

где $\gamma_б$ - удельный вес грунта бермы.

Если основание сложено торфяными грунтами, то допускаемая нагрузка рассчитывается по формуле:

$$P_{доп} = \frac{\pi C}{tg\,\varphi\ (ctg\varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi)}, \tag{47}$$

Необходимая ширина пригрузочных берм определяется из условия активного воздействия в зонах, в которых напряжённое состояние от веса самой насыпи оказывается наиболее опасным по условию нарушения прочности грунта слабого основания.

При мощности слабой толщи $H>H_{max}$ ширина бермы должна быть не менее:

$$l_{пр.б.} = b_{ср}\left(\frac{1 + 0{,}8\cos\alpha}{0{,}6\sin\alpha} - 1\right). \tag{48}$$

При $H<H_{max}$ соответственно:

$$l_{пр.б.} = \sqrt{b_{ср}^2 + \frac{2bH}{tg\varphi} - H^2} - b_{ср} + 1{,}3H, \tag{49}$$

где Hmax - максимально допустимая мощность слабого основания, определяемая по формуле:

$$H_{max} = b_{ср}\,\frac{\cos\alpha + 0{,}8}{\sin\alpha}, \tag{50}$$

α - угол видимости, определяется из выражения:

$$\frac{\sin\alpha}{\pi} = \frac{\cos\varphi}{P_0} + \frac{\alpha\sin\varphi}{\pi}. \tag{51}$$

11. СООРУЖЕНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА БОЛОТАХ

11.1. Общее положение

Технологические схемы составлены в соответствии с конструктивными решениями насыпей [4] и классификацией торфяных болот и пластов болотных грунтов (табл. 11.1.1).

Процесс возведения насыпей на болотах включает в себя: подготовку основания под насыпь; отсыпку части, находящейся

Таблица 11.1.1

Характеристика болотных отложений

Разновидность отложений	Физико-механические характеристики									Тип болот, сложенных этой разновидностью
	Влажность W, %	Степень разложения $D_р$	Степень волокнистости $Ф$,%	Коэффициент пористости	Модуль деформации E, т/м^2, при нагрузке P, т/м^2		Сопротивление сдвигу в природном залегании, т/м^2	Модуль осадки e_p, мм/м, при нагрузке P, т/м^2		
					5	10		5	10	
Торф сухой	До 300	25-45	75-60	5	Более 25	Более 33	3-5	Менее 200	Менее 300	I
Торф маловлажный	300-600	25-45	75-60	5-8	25-15	33-23	1,3-3	200-350	300-420	I
Торф средней влажности	600-900	25-45	75-60	8-14	15-11	23-19	1,0-1,7	350-450	420-530	I
Торф очень влажный	900-1300	25-45	75-60	14-20	11-9	19-17	0,6-1,1	450-550	530-600	I
Торф избыточной влажности	Свыше 1300	25-45	75-60	20	9-8,5	17-15	0,5-1,1	550-600	600-650	II III
Сапронель маловлажный	200	-	-	-	Более 30	-	Более 2	Менее 150	-	I
Сапронель средней влажности	200-500	-	-	-	30-10	-	2-1,0	150-400	-	II
Сапронель сильновлажный	500-1000	-	-	-	Менее 10	-	1,0-0,1	Более 400	-	III
Сапронель жидкий	Более 1000	-	-	-	-	-	Менее 0,1	-	-	
Мергель маловлажный	До 100	-	-	-	Более 13	-	Более 2	Менее 400	-	I
Мергель средней влажности	100-300	-	-	-	Менее 13	-	2-1,0	Более 400	-	I II

ниже уровня болота; отсыпку верхней части, находящейся выше поверхности болота; устройство водоотводных канав, прорезей, канав-торфоприёмников.

Для ускорения стабилизации и повышения устойчивости насыпей проектами могут предусматриваться следующие работы: осушение грунта слабого основания; устройство траншей, вертикальных песчаных свай-дрен; разрыхление растительно-корневого покрова болот в основании насыпей; устройство канав-торфоприемников, водоотводных канав; упрочнение грунта слабого основания; укладка геосинтетического материала.

11.2. Технологическая схема устройства насыпи на болотах типа I

Область применения: отсыпка насыпей на болотах типа I глубиной до 3 м с устройством водоотводов и разработкой траншей в основании насыпи экскаваторами.

Состав технологических процессов:

- устройство водоотводных канав экскаватором с профилирующим ковшом;
- разработка траншеи в основании насыпи экскаваторами с удалением торфа в кавальер или с погрузкой в автосамосвалы с отвозкой в отвал;
- отсыпка нижней части насыпи автосамосвалами;
- послойная отсыпка верхней части насыпи с уплотнением грунта грунтоуплотняющими машинами;
- зачистка водоотводных канав.

Технология работ показана на рис. 11.2.1.

Устройство водоотводных канав рекомендуется выполнять с опережением основного фронта работ с целью предварительной мелиорации грунта основания насыпи. Канава разрабатываются сразу на полный профиль при движении экскаватора вдоль её оси. Для разработки канавы следует применять гидравлические экскаваторы на уширенном гусеничном ходу, оборудованные обратной лопатой и профилирующим ковшом.

Разработку траншеи в основании насыпи в зависимости от проектного решения ведут с частичным или полным (до минерального дна) выторфовыванием при движении экскаватора вдоль бровок траншеи с укладкой торфа в кавальеры или с погрузкой в автосамосвалы.

Часть насыпи, находящаяся ниже поверхности болота, отсыпается сразу на всю ширину и высоту ("с головы"). Разрыв между работами по подготовке основания и отсыпкой насыпи не должен превышать 1-2 смены.

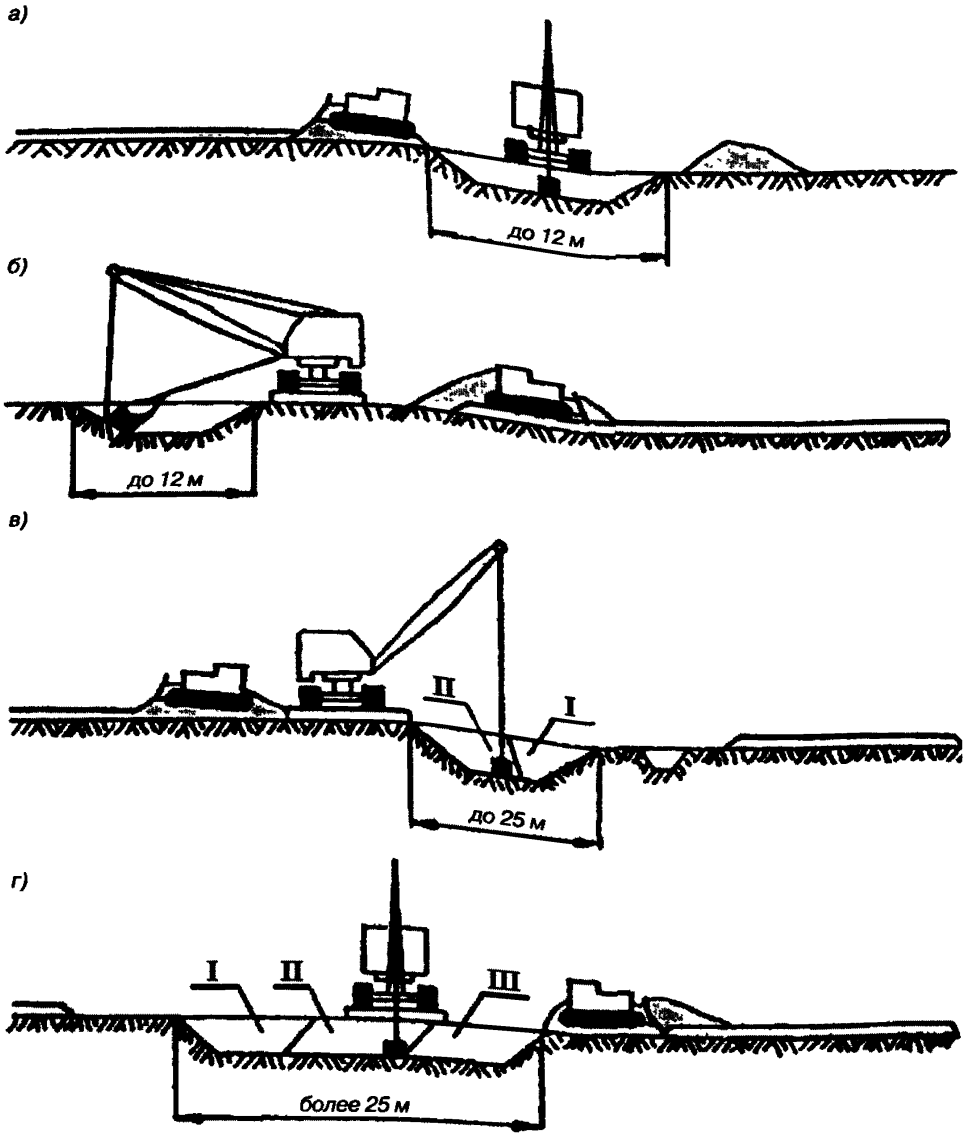


Рис. 11.2.1. Схемы разработки траншеи:

а - при движении экскаватора по её оси; *б* - при одностороннем движении экскаватора; *в* - при двустороннем движении экскаватора; *г* - тремя проходками (I, II, III) экскаватора

При отсыпке насыпи "с головы" в зависимости от ширины слоя автосамосвалы перемещаются с разворотом на насыпи или с использованием разъездов. Грунт разрабатывается в карьерах или выемках экскаваторами с прямой или обратной лопатами, драглайнами с ковшами вместимостью от 0,65 до 1,6 м³ и од-

ноковшовыми фронтальными погрузчиками с вместимостью ковша от 2,0 до 5,0 м³. В качестве транспортных средств рекомендуются автомобили-самосвалы грузоподъемностью до 15 т.

Интенсивный технологический режим уплотнения предусматривается после засыпки траншеи, укладки ГСМ и устройства защитного слоя дренирующего грунта толщиной 0,5 м. Порядок расчётов $K_{без}$ изложен в п. 4. Продолжительность уплотнения основания через защитный слой принимается равной времени, необходимому для фильтрационной консолидации грунтов основания.

Отсыпку части насыпи, находящейся выше уровня поверхности болота, следует вести горизонтальными слоями. Технология производства работ предусматривает разделение каждого слоя насыпи по ширине на две полосы, а по длине (вдоль насыпи) - на две захватки.

Автосамосвалы, двигаясь по одной полосе насыпи, разгружают грунт на другой. После разгрузки грунта (на захватке I) машины доходят до разъезда, где разворачиваются и снова возвращаются для загрузки. Вслед за отсыпкой на захватке I грунт разравнивается бульдозером, а на захватке II уплотняется грунтоуплотняющей машиной. После окончания отсыпки и уплотнения грунта на одной полосе слоя на участке между разъездами по ней открывается движение автосамосвалов, а грунт отсыпается на другой полосе слоя.

Отсыпать насыпь по направлению к карьеру сразу на всю ширину слоя без деления на две полосы не рекомендуется, так как при этом автосамосвалы после разворота на разъезде должны подаваться к месту разгрузки задним ходом, что приводит к снижению их производительности.

Ширина площадки разъездов должна быть не менее 5 м, высота разъезда - меньше высоты насыпи на толщину отсыпаемого слоя.

В комплект машин, занятых на разработке водоотводов и траншей, входят 2 экскаватора и бульдозер.

Технико-экономические показатели:

- производительность комплекта при рытье траншей-85 м³/ч;
- при устройстве водоотводов (один экскаватор) - 25 м³/ч.

При отсыпке насыпи с укладкой в основание геосинтетического материала. Состав технологических процессов (см. рис. 11.2.2):

- подготовка основания под укладку ГСМ;
- раскатка рулонов ГСМ и закрепление их;

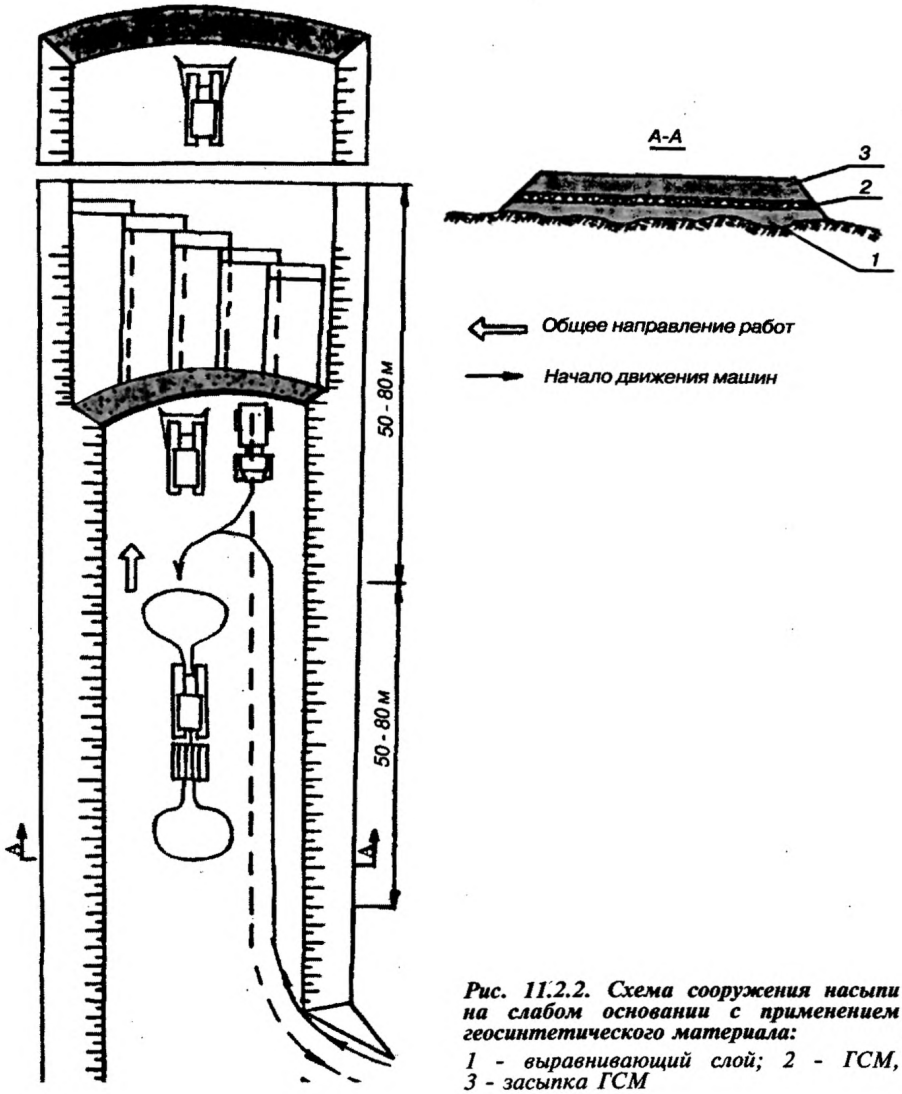


Рис. 11.2.2. Схема сооружения насыпи на слабом основании с применением геосинтетического материала:
1 - выравнивающий слой; 2 - ГСМ, 3 - засыпка ГСМ

- засыпка полотен грунтом;
- уплотнение грунта;
- устройство земляного полотна над уложенным ГСМ.

Подготовка под укладку ГСМ заключается в планировке основания. При наличии на участке поверхностной воды перед укладкой ГСМ должен быть отсыпан слой грунта толщиной 20 - 30 см, но не менее глубины подтопления.

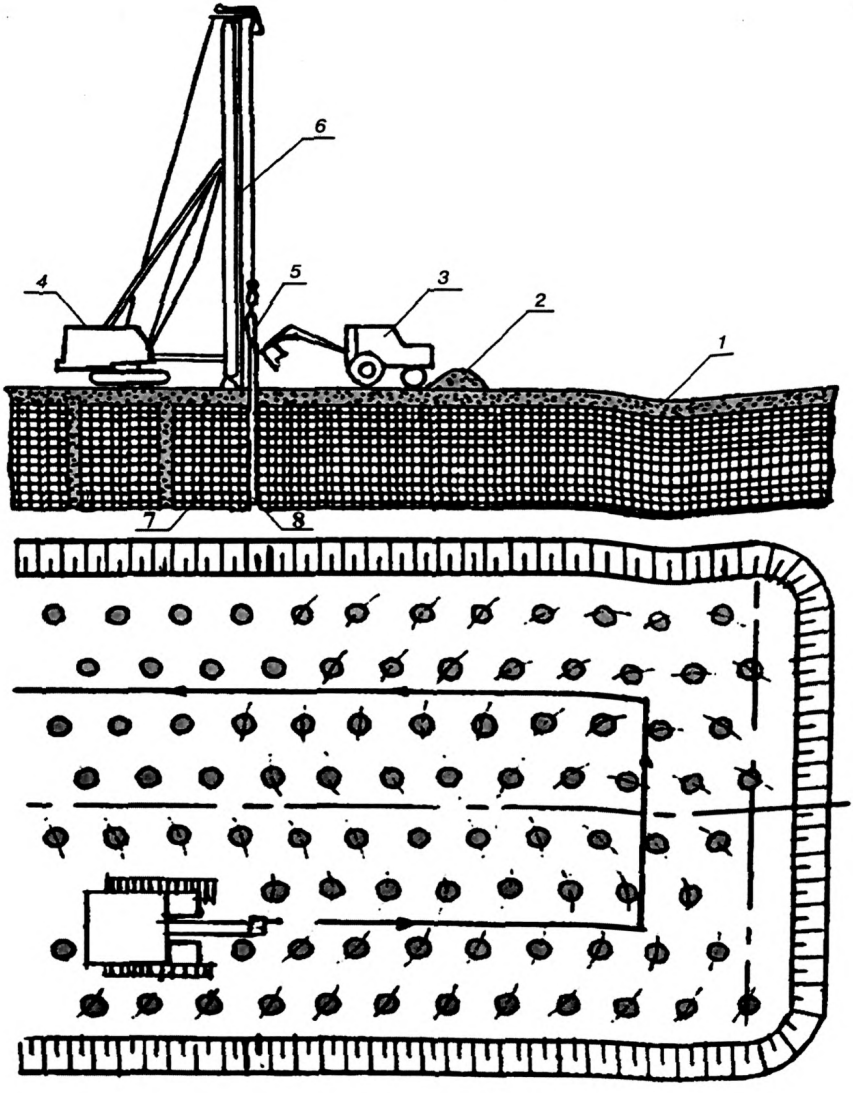


Рис. 11.2.3. Технологическая схема устройства вертикальных песчаных дрен:
1 - защитный слой; *2* - песок для дрен; *3* - погрузчик; *4* - базовая машина; *5* - вибропогружатель; *6* - копровая мачта; *7* - торф; *8* - обсадная труба

Рулоны ГСМ раскатываются с перекрытием полотен на 20 см и закрепляются через каждые 1,5 м п-образными скобами или спайкой (сваркой). После окончания укладки ГСМ составляется акт на скрытые работы. Засыпка грунтом прослойки из

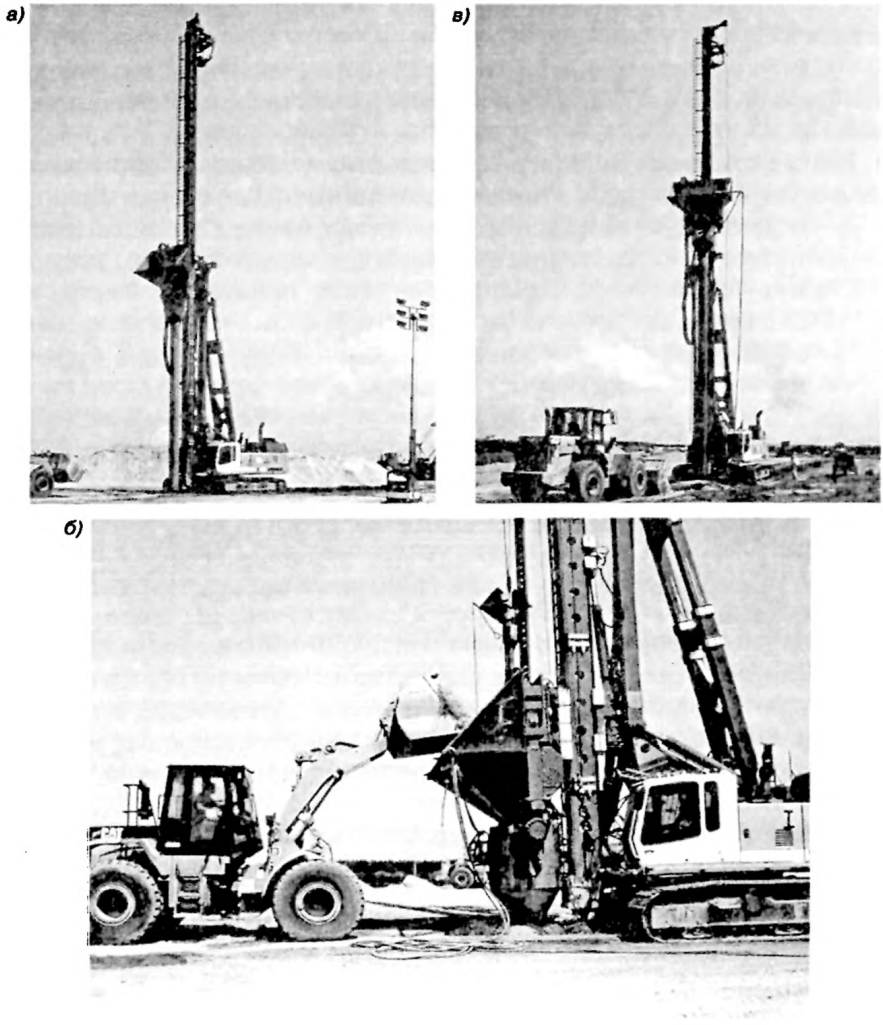


Рис. 11.2.4. Последовательность устройства песчаных свай с применением буровых установок LRB (фирма Либхерр):

а) вибропогружение инвентарной трубы; *б)* заполнение трубы песком; *в)* поэтапное извлечение трубы с уплотнением песка виброуплотнителем (I, II, III)

ГСМ производится способом "с головы" с разравниванием его от середины к краям. Непосредственный проезд всех видов машин по прослойке запрещается.

Комплект машин и механизмов: экскаватор с ковшом 1,0-1,6 м³ в карьере; автосамосвалы грузоподъемностью 12 т по расчету; бульдозер 10 т; грунтоуплотняющая машина; механизм для раскатки ГСМ.

Для укрепления слабых оснований устраивают песчаные дрены (рис. 11.2.3), цементно-песчаные, известковые и щебёночные сваи.

Интенсивная технология уплотнения основания производится до устройства свай. Она даёт двойной эффект:

- укрепляет слабое основание насыпи в межсвайном пространстве, снижает вероятность осадок между сваями, которые могут привести к неравнопрочности основания и разрыву ГСМ возле свай;
- обеспечивает возможность перемещения тяжёлой буровой техники по основанию (рис. 11.2.4).

12. МОНИТОРИНГ ИНТЕНСИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОЗВЕДЕНИЯ НАСЫПИ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

12.1. Контроль интенсивных технологических параметров

Контроль деформационных и прочностных характеристик грунтов основания предназначен для оценки соответствия фактических и расчётных значений грунтовых характеристик в ходе возведения насыпи в период консолидации.

Осадка слоёв основания измеряется с помощью реперов, которые устраиваются в подготовительный период. Измерения осадки основания проводятся после отсыпки каждого слоя насыпи. Окончательная осадка скважин определяется как по результатам нивелирования, так и контрольным бурением скважин. Более подробная методика наблюдения за деформациями изложена ниже.

Характеристики влажности и прочности грунтов определяются после отсыпки 2 м насыпи (расчётная зона) с помощью контрольной аппаратуры и отбором проб. По фактическим характеристикам влажности, плотности и прочности определяется $K_{без}$ грунтов основания, и корректируются рекомендации по дальнейшим режимам отсыпки слоёв насыпи (также с контро-

лем состояния грунтов). Контроль плотности и влажности грунтов насыпи может быть осуществлён методом режущего кольца, прибором Ковалёва и другими гостированными способами после отсыпки каждого слоя.

Результаты контрольных измерений и расчёты заносятся в журналы производства работ и качества уплотнения грунта.

Основные задачи наблюдений за деформациями насыпи в ходе строительства. При сооружении земляного полотна на слабых грунтах, кроме обусловленного общими нормативными документами контроля качества строительства, необходимы специальные наблюдения за деформациями насыпи и основания[5]. Большинство конструктивных решений предусматривает определённый технологический режим возведения земляного полотна, который невозможно правильно осуществить без систематических визуальных и инструментальных наблюдений. Поэтому мероприятия по наблюдению за деформациями земляного полотна в период строительства до момента сдачи объекта в эксплуатацию должны быть включены в смету на строительство.

Основными задачами наблюдений являются:

- контроль за величиной осадки и затуханием её во времени;
- фиксирование возможных горизонтальных смещений грунта насыпи;
- выявление образования выпора слабого грунта основания.

Основные наблюдения выполняются производственной лабораторией. Дополнительно к перечисленным наблюдениям в проекте организации строительства могут быть оговорены наблюдения по специальным методикам за изменениями порового давления в грунте, послойными осадками в основании, изменением гидрологического режима, упругими прогибами покрытия, а также за длительными осадками в период эксплуатации дороги.

Методика наблюдений за деформациями насыпи. Наблюдения за вертикальными деформациями выполняются по осадочным маркам [5]. Простейшая конструкция марки состоит из квадратной стальной плиты толщиной 4-6 мм размером не менее 0,5 х 0,5 м с приваренными с нижней стороны по центру заострённым штырём (длиной 30 см) для фиксирования и с верхней стороны мерной штангой (из трубы диаметром 50 мм). Длина мерной штанги принимается равной проектной толщине насыпного слоя в целях предохранения от повреждений её транспортом при возведении насыпи. Штангу можно составлять из отдельных элементов длиной по 30-40 см. Плиту закладывают на поверхно-

сти слабой толщи непосредственно перед отсыпкой первого слоя насыпи.

Вертикальная отметка плиты фиксируется нивелированием с установкой рейки на обрез мерной штанги. Отметки должны быть увязаны с основной геодезической сетью.

Поперечники для наблюдения за осадкой назначают в самом глубоком месте и далее через каждые 50 м. Осадочные марки устанавливают по три на каждом поперечнике (одну осевую и две боковые в 1 м от бровки насыпи).

Наблюдения за горизонтальными перемещениями и возможным выпором ведут по боковым маркам, установленным в одном створе, а также по дополнительным, установленным на поперечнике на расстоянии 3-5 м от подошвы насыпи. Замеры горизонтальных смещений ведутся с помощью теодолитной съёмки.

Все наблюдения за вертикальными деформациями и горизонтальными смещениями осуществляются при возведении насыпи ежедневно, первые три месяца после полного возведения насыпи - еженедельно, в дальнейшем - до сдачи в эксплуатацию - 2 раза в месяц. При обнаружении резкого увеличения осадки или смещений насыпи в плане её отсыпку немедленно прекращают для выявления причин деформаций и корректировки проектных решений. В случае фиксирования потери прочности основания назначаются дополнительные мероприятия для обеспечения устойчивости и предупреждения дальнейшего развития деформации насыпи и основания.

При наличии четырёх-пяти измерений осадки в первый месяц после возведения насыпи дальнейшую осадку можно прогнозировать по формуле [5]:

$$S_t = S_n \frac{t}{T + t} \qquad (52)$$

где S_n - полная расчётная осадка, определённая по результатам компрессионных испытаний;

t - время с начала отсыпки насыпи;

T - параметр, характеризующий интенсивность затухания осадки.

Для использования этой формулы строят график консолидации в координатах (t,t/S), что даёт возможность спрямить кривую осадки. В этом случае ход осадки записывается в виде уравнения $t/S = at + b$. Далее находят величину параметра $T = b\ S_n$, где

b - отрезок, отсекаемый графиком на оси t/S.

Тангенс угла наклона графика есть величина, обратная стабилизированной осадке $\alpha = 1/S_n$.

В случаях, если данные наблюдений за фактическими осадками существенно отличаются от расчётного прогноза протекания осадки, то в рабочем проекте следует уточнить расчётные характеристики грунта (коэффициенты консолидации и сжимаемости) путём обратного пересчёта по фактическим данным осадки и на их основе уточнить прогноз деформации, конструктивные решения и режим отсыпки насыпи.

В процессе возведения насыпи на слабом грунте необходимо систематически контролировать толщину отсыпанного слоя, определяющую величину нагрузки на основание в заданный момент времени. Для этого можно использовать те же осадочные марки с наращиваемыми штангами, на которых должна быть нанесена разметка. Контроль может быть осуществлён также с помощью лёгкого динамического зонда или путём бурения зондировочных скважин.

Наблюдения за деформациями насыпи на слабом основании проводятся и в процессе эксплуатации земляного полотна в первый год после завершения строительства. Такие наблюдения обязательны при технологическом перерыве и стадийном строительстве дороги.

12.2. Управление технологическими процессами

I. До начала возведения насыпи необходимы:

а) определение следующих характеристик грунтов слабого основания (по лабораторным испытаниям): плотность грунта $\gamma_{ср}$; природная влажность $W_{пр}$; показатель текучести J_L; модуль осадки ε; модуль деформации E; сцепление C; угол внутреннего трения φ; коэффициент фильтрации $K_ф$; коэффициент пористости e.

При этом следует предусмотреть: проведение сдвиговых испытаний по методике "плотность - влажность"; консолидационных испытаний при однократном приложении нагрузок для расчёта коэффициента консолидации C_u и коэффициента фильтрации $K_ф$, и консолидационных испытаний при последовательном приложении нагрузок также для расчёта коэффициента консолидации C_u и коэффициента фильтрации $K_ф$.

б) установка измерительной аппаратуры: мездозы для определения напряжений и модуля деформации; пьезометры для определения порового давления; осадочные марки для фиксирова-

ния осадки; иглофильтры для наблюдения за уровнем грунтовых вод.

в) расчёт (прогноз) параметров интенсивной технологии: давление от катка ($P_{ст} + P_в$);

- модули деформации грунтов каждого слоя слабого основания E_i; осадка основания S; расчёт устойчивости основания по КЦП и $K_{без}$.

По перечисленным данным назначаются толщина отсыпки первого слоя $h_{1слоя}$ и время уплотнения первого слоя $t_{упл\ I\ слоя}$.

II. В процессе возведения опытной насыпи выполняются следующие работы и расчёты:

1. Вырезка растительного слоя, устройство прорезей, установка марок на дно прорезей и вырезанного слоя, засыпка ПГС, уплотнение статическим катком.



Рис. 12.2.1.

2. После устройства прорезей и статического уплотнения нижнего замененного слоя (рис. 12.2.1):

а) расчёт прогнозных значений параметров И.Т.: модуль деформации E; осадка S.

б) измерение параметров по показаниям приборов: модуль деформации E; поровое давление $P_п$; осадка S; изменение горизонта грунтовых вод (ГГВ) $\Delta h_{ггв}$.

в) подбор и укладка геосинтетического материала (ГСМ).

Технологическое решение о продолжительности уплотнения первого слоя.

3. После отсыпки и уплотнения первого слоя виброкатком (рис. 12.2.2):

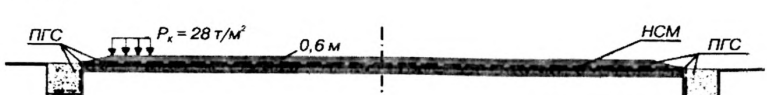


Рис. 12.2.2.

а) расчёт (прогноз) параметров И.Т.: модуль деформации E; осадка S.

б) измерение параметров по показанием приборов: модуль деформации E; поровое давление P_n; осадка S; изменение горизонта грунтовых вод (ГГВ) $\Delta h_{ггв}$.

в) компрессионные испытания: модуль деформации E; изменение пористости грунта Δe.

г) испытания на сдвиг: сцепление C; угол внутреннего трения φ.

д) расчёт коэффициента безопасности $K_{без}$ и коэффициента устойчивости $K_{уст}$ по КЦП.

Технологическое решение о продолжительности и интенсивности вибрационного уплотнения последующих слоёв при максимально возможной нагрузке и продолжительности вибрации для наибольших значений модуля деформации и осадки под контролем $K_{без}$.

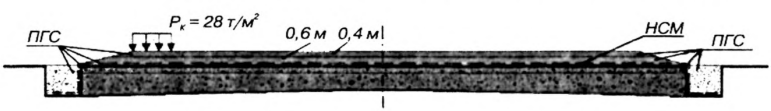


Рис. 12.2.3.

4. После отсыпки и уплотнения каждого последующего слоя (рис. 12.2.3):

а) расчёт прогнозных значений параметров И.Т.: модуль деформации E; осадка S; коэффициента безопасности слабого основания $K_{без}$.

б) измерение параметров по показанием приборов: модуль деформации E; поровое давление P_n; осадка S; изменение горизонта грунтовых вод (ГГВ) $\Delta h_{ггв}$.

в) компрессионные испытания: модуль деформации E; изменение пористости грунта Δe.

г) испытания на сдвиг при возведении насыпи на половину высоты: сцепление C; угол внутреннего трения φ.

Технологическое решение: расчёт фактического $K_{без}$ и нагрузки P_0 на следующий слой. Проверка устойчивости после отсыпки 1/2 и 3/4 высоты насыпи.

5. После отсыпки всей насыпи на проектную высоту (рис. 12.2.4):

а) расчёт параметров И.Т.: модуль деформации E; осадка S.

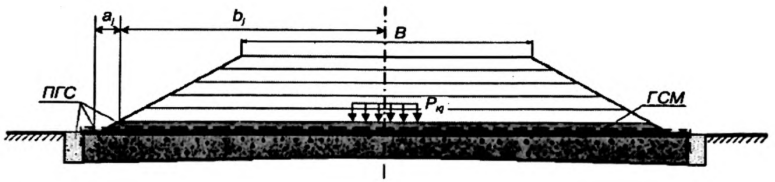


Рис. 12.2.4.

б) измерение параметров по показанием приборов: модуль деформации E; поровое давление P_n; осадка S; изменение горизонта грунтовых вод (ГГВ) $\Delta h_{ггв}$.

в) компрессионные испытания: модуль деформации E; изменение пористости грунта Δe.

г) испытания на сдвиг: сцепление C; угол внутреннего трения φ.

д) консолидационные испытания при однократном приложении расчётных нагрузок: коэффициент консолидации C_u; коэффициент фильтрации K_ϕ.

е) анализ фактической динамики и сравнение с прогнозом: модуля деформации E; осадки S; коэффициента безопасности слабого основания $K_{без}$; сцепления C; угла внутреннего трения φ; коэффициента устойчивости $K_{уст}$.

Вывод о результатах применения интенсивной технологии на всём участке: а) общая осадка S; б) улучшение модуля деформации E; в) улучшение прочностных характеристик C и φ.

12.3. Анализ изменения деформационных и прочностных характеристик грунтов слабого основания при интенсивной технологии

При назначении и реализации интенсивных технологических режимов одним из решающих этапов является контроль изменения деформационных и прочностных характеристик. Так как при последующем слое отсыпки предлагается в качестве исходных данных брать улучшенные показатели модуля деформации - основной деформационной характеристики грунтов основания.

Авторы предлагают рассмотреть два независимых способа контроля изменения деформационных свойств грунтов основания:

I способ: анализ через изменение состояния показателей физических свойств грунта (ρ, W).

II способ: анализ через изменение механических характеристик грунта (*e*, *E*) по данным компрессионных испытаний.

I способ

1) Определяем значения коэффициента пористости $e_{ін}$ начального состояния грунта *i*-го слоя основания до отсыпки насыпи:

$$\varepsilon_{ін} = \frac{\rho_{iμ}\,(1 + W_{ін})}{\rho_{гр}^{ін}} - 1\,, \qquad (53)$$

где $\rho_{iμ}$ - плотность частиц грунта *i*-го слоя основания, т/м^3;

$\rho_{гр}^{ін}$ - начальная плотность грунта *i*-го слоя основания до возведения насыпи, т/м^3;

$W_{ін}$ - начальная природная влажность грунта *i*-го слоя основа-ния до возведения насыпи, в долях.

2) Определяем значения коэффициента пористости ε_{ij} состояния *i*-го слоя грунта после отсыпки *j*-го слоя насыпи:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\rho_{iμ}\,(1 + W_{ij})}{\rho_{гр}^{ij}} - 1\,, \qquad (54)$$

где $\rho_{iμ}$ - плотность частиц грунта *i*-го слоя основания, т/м^3;

$\rho_{гр}^{ij}$ - плотность грунта *i*-го слоя основания после возведения *j*-го слоя насыпи, т/м^3;

W_{ij} - природная влажность грунта *i*-го слоя основания после возведения *j*-го слоя насыпи, в долях единицы.

3) Определяем изменение модуля осадки с учётом изменения коэффициента пористости от $\varepsilon_{ін}$ до ε_{ij}:

$$\Delta e_{ij} = 1000\,\frac{\varepsilon_{in} - \varepsilon_{ij}}{1 + \varepsilon_{in}}\,, \qquad (55)$$

4) Определяем изменение модуля деформации грунта *i*-го слоя основания после отсыпки *j*-го слоя насыпи с учетом изменения модуля осадки Δe_{ij}:

$$\Delta E_{ij} = 1000 \frac{P_{0j}}{\Delta e_{ij}}, \qquad (56)$$

где P_{0j} - расчётная нагрузка от веса j-го слоя отсыпанной насыпи с катком, кг/см^2.

II способ

1) По лабораторным данным компрессионной кривой изменения коэффициента пористости снимаем показатели значений коэффициента пористости ε_0 и ε_p

2) При расчётной нагрузке P определяем значение модуля осадки e:

$$e = 1000 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_p}{1 + \varepsilon_0}, \qquad (57)$$

где ε_0 - начальный коэффициент пористости грунта основания;

ε_p - коэффициент пористости при нагрузке P.

3) Определяем изменение модуля деформации ΔE_p при расчётной нагрузке P:

$$\Delta E_p = 1000 \frac{P}{e_p}. \qquad (58)$$

Рассмотрим детально изменение деформационных и прочностных характеристик грунтов основания при строительстве опытной насыпи подходов к мостовому переходу через р. Каму методом интенсивной технологии.

В качестве примера рассмотрим динамику изменения деформационных и прочностных характеристик в процессе возведения насыпи высотой $H = 8$ м на ПК 9+50. До начала проведения работ были проведены геологические изыскания района строительства, которые установили следующие физико-механические показатели (табл. 12.3.1). После отсыпки и уплотнения 3-х слоёв по 0,4 м насыпи (H_1) были пробурены скважины и отобраны монолиты грунтов для лабораторных испытаний, по данным которых были установлены следующие физико-механические показатели грунтов основания.

Когда отсыпали половину проектной отметки насыпи (H_2) вновь были пробурены очередные скважины и отобраны монолиты слабых грунтов для консолидационных, компрессионных и

Таблица 12.3.1

Динамика изменения физико-механических характеристик грунтов основания

Показатели	H_0	H_1	H_2	H_3
Плотность ρ, т/м^2	1,9	1,965	1,975	1,98
Коэффициент пористости ε	0,840	0,759	0,729	0,718
Влажность W, доли	0,31	0,28	0,265	0,26
Модуль осадки e, мм/м	-	44	60	66
Модуль деформации E, т/м^2	650	1103	1435	1738
Угол внутреннего трения φ, град	9	17	20	21
Сцепление C, т/м^2	0,7	0,86	0,97	1
Сопротивление грунта сдвигу S_r, т/м^2	1,603	3,173	3,845	4,192

сдвиговых испытаний, результаты которых приведены в табл. 12.3.1.

После возведения насыпи до проектной отметки (H_3) с основ-ной площадки бурят последние контрольные скважины, по которым устанавливаются окончательные деформационные и прочностные показатели грунтов основания.

По данным сдвиговых испытаний монолитов грунта из скважин до строительства насыпи, в процессе отсыпки насыпи и после возведения определяются данные удельного сцепления C и угла внутреннего трения φ.

Согласно обработке полученных характеристик в ходе испытаний были получены эмпирические зависимости модуля деформации E, удельного сцепления C и угла внутреннего трения j, представляющие собой функции E; C; $\varphi = f(W, \varepsilon_н, \rho_н)$.

$$E = 1{,}41\ \varepsilon_н\ W^{-3{,}38\ \rho_н \varepsilon_н}, \tag{59}$$

$$C = 2{,}88\ \frac{\rho_н\, e^{-6{,}05\ \frac{W}{\varepsilon_н}}}{\varepsilon_н}; \tag{60}$$

$$\varphi = -43\ \rho_н \varepsilon_н\ \ln(W) - \rho_н^{7{,}9\ \varepsilon_н}, \tag{61}$$

где $\rho_н$ - начальная плотность грунта в естественном зале-гании, т/м^3;

$\varepsilon_н$ - начальный коэффициент пористости грунта;

W -значение влажности на момент отбора монолитов, в долях.

Произошёл отжим поровой воды, о чём свидетельствует значительное уменьшение влажности W и увеличение плотности ρ грунта. Полученные значения угла внутреннего трения и сцепления по результатам испытаний на сдвиг характерны грунтам мягкопластичной консистенции. Произошло увеличение сопротивления грунта сдвигу в 2,3 - 2,5 раза, а значит, увеличилась прочность и устойчивость слабого основания против выпора.

По полученным значениям изменения модуля деформации, угла внутреннего трения и сцепления можно сделать окончательный вывод, что грунт перешёл из текучепластичной в мягкопластичную консистенцию.

13. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Для улучшения дренажа при большой глубине слабых оснований может также применяться технология устройства дренажных проколов с использованием геосинтетического материала Colbond или Amerdrain (рис. 13.1), разработанная фирмой ЗАО "Геотерра" ViaCon group (США, Швеция). Она состоит в погружении металлического наконечника-лидера, к которому прикреплён дренирующий геотекстиль в виде анкерной пластины. Под высоким давлением на основание, которое создаёт *интенсивная технология* вода поднимается по дренажу и через верхний дренирующий слой и геотекстиль отводится в канавы.

Эффект обеспечивают следующие факторы:

-сокращение объёма вырезки слабого основания;

-уменьшение объёма работ по устранению деформаций до рожной одежды или верхнего строения пути (ВСП) в экс луатационный период;

-сокращение срока производства работ по сравнению со сплошной вырезкой слабого основания.

Наиболее распространённое проектное решение связано с вырезкой слабых грунтов. Также одновременно повышается прочность основания и снижается вероятность многолетних осадок, в связи с сокращением периода консолидации слабого основания.

Экономический эффект рассчитывается по формуле:

$$Э = V_1C_1 + V_2C_2 - \Sigma (V_{дt}\, C_{дt}),$$

где V_1 - дополнительный объём работ, связанный с интенсивной технологией на компенсацию осадки S;

C_1 - единичная расценка на отсыпку 1 м^3 насыпи в режиме интенсивной технологии;

V_2 - объём дренажных прорезей;

C_2 - единичная расценка на разработку слабого грунта в прорезях и засыпку их дренирующим грунтом (или на производство глубинных дренажных работ с применением технологий устройства песчаных свай-дрен или дренажных проколов);

$V_{дt}$ - объём деформаций ВСП или дорожной одежды при осадках S в эксплуатационный период;

$C_{дt}$ - единичная расценка на выправку ВСП или ремонт одежды в эксплуатационный период;

T - период стабилизации осадки слабого основания.

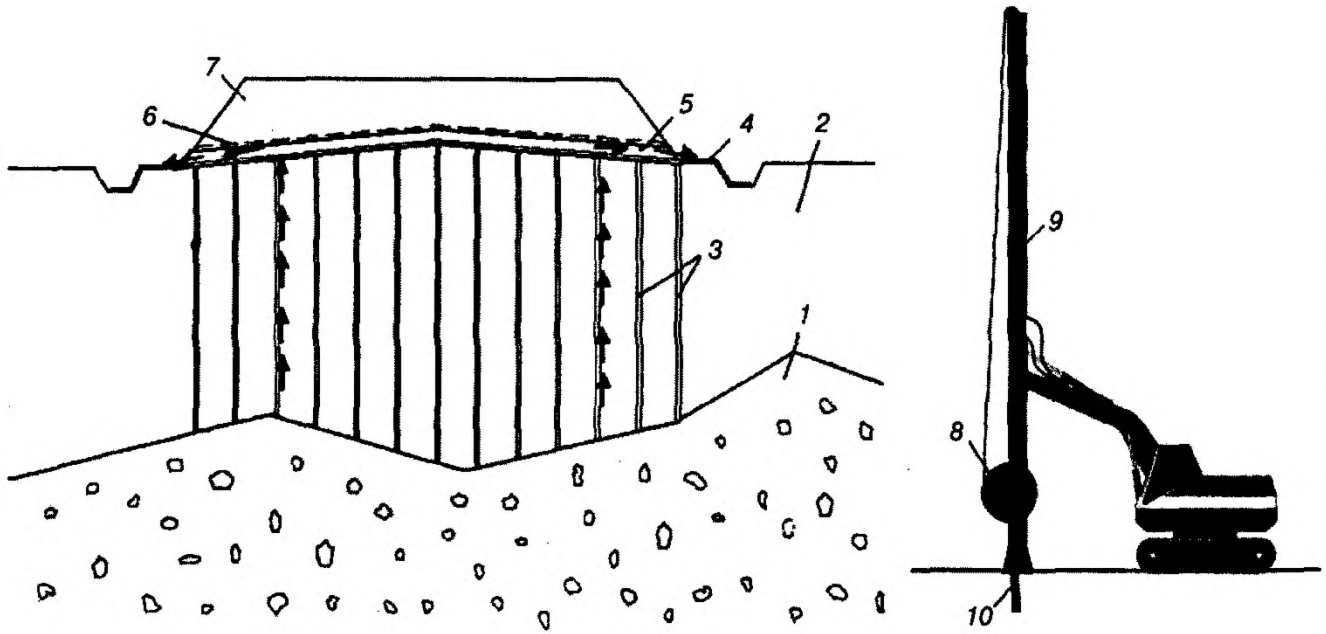


Рис. 13.1. Устройство вертикальных дренажных проколов на строительстве КАД в г. Санкт-Петербург:

1 - коренные породы, 2 - слабонесущие грунты, 2 - вертикальный дренаж "Colbon", 4 - нетканый геотекстиль Bonar NW 15, 5 - дренажный слой из песчано-гравийной смеси, уплотняется тяжёлыми вибрационными катками до достижения расчётной степени консолидации, 6 - тканый геотекстиль (Bonar HS 150/50), 7 - возводимая послойно проектная насыпь, 8 - дренажная лента, 9 - навесная мачта, 10 - игла в виде анкерной пластины.



ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ИНЖЕНЕРНО - ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ

Таблица П.1.1

Показатели механических характеристик грунтов основания (по данным ОАО "Уралгипротранс")

Тип грунта	Средняя плотность ρ, т/м³	Показатели механических свойств		
		Модуль деформации Е, т/м²	Угол внутреннего трения φ, град.	Сцепление С, т/м²
Суглинок тугопластичный	1,97	2700	17,3 - 15,2	1,6 - 1,45
Суглинок мягкопластичный	1,94	1160	17,7 - 14,2	1,0 - 0,7
Суглинок текучепластичный	1,91	800	11,4 - 9	1,1 - 0,7
Глина мягкопластичная	1,86	760	15,6 - 10,9	1,8 - 1,1

Таблица П.1.2

Показатели физико-механических свойств глинистых грунтов

Консистенция грунта	Подвид	Плотность ρ, т/м³	Показатели механических свойств		
			Модуль деформации Е, т/м²	Угол внутреннего трения φ, град.	Сцепление С, т/м²
Полутвердая	Супесь	2,1	5700	30	1,5
	Суглинок	2,0	3600	28	2,8
	Глина	1,99	3600	20	5,0
Тугопластичная	Супесь	1,98	4500	24	1,0
	Суглинок	1,96	2700	23	2,0
	Глина	1,97	2250	16,5	3,5
Мягкопластичная	Супесь	1,90	3800	20	0,5
	Суглинок	1,90	1900	17	1,5
	Глина	1,95	1250	14	2
Текучепластичная	Супесь	1,85	1900	≤18	0,2
	Суглинок	1,85	1250	13	1
	Глина	1,90	600	8	1
Текучая	Супесь	1,85	1250	14	0,00
	Суглинок	1,80	600	10	0,5
	Глина	1,80	300	6	0,5

Таблица П.1.3

Значения показателей физико-механических свойств иольдиевых глин

Разновидность грунта	Относительная влажность $W_{отн}$	Угол внутреннего трения φ, град.	Сцепление С, т/м²	Предел структурной прочности при компрессии, т/м²	Структурное сцепление C_c, т/м²
Текучепластичная	< 1,0	> 7	1,5	-	> 1
Скрытотекучая А	1,0 - 1,5	7 - 3	2 - 1	> 5	1,5 - 0,7
Скрытотекучая В	1,5 - 2,5	3 - 0	1,5 - 0,5	5 - 1,8	0,7 - 0,3

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ

Модель катка	Масса, т	Вынуждающая сила, кН	Ширина вальца, м	Частота вибрации, Гц	Общая нагрузка от катка кН (т)
HAMM 2220D	12	104	2,2	30 - 33	224 (22,4)
HAMM 2520D	17	190	2,2	27 - 30	360 (36,0)
HAMM 2522DS-3	19,5	521	2,2	27 - 30	716 (71,6)
Bomag BW219PDH-3	19,47	304	2,13	35	498 (49,8)
Vibromax W1803D	18,6	345	2,1	28	531 (53,1)
Vibromax W1805D	19,65	370	2,1	29	566 (56,6)
Stavostroy VV2000D	20,5	400	2,24	29	605 (60,5)
Stavostroy VV2000PD	20,6	400	2,24	34	606 (60,6)
Dynapac CA602D	18,6	275	2,13	25	461 (46,1)
Dynapac CA602PD	18,6	275	2,13	31	461 (46,1)
ДУ-85	13	150	2,0	24 - 40	280 (28,0)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА N В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ КОНСОЛИДАЦИИ U

Таблица П.3.1

Значения фактора времени *N* в зависимости от степени консолидации при равномерно распределенной нагрузке.

U, %	N
20	0,03
30	0,07
40	0,12
50	0,20
60	0,29
70	0,40
80	0,57
85	0,69
90	0,85
95	1,13

Таблица П.3.2

Значения фактора времени *N* для треугольной эпюры нагрузки в зависимости от степени консолидации

U, %	N при нагрузке	
	Возрастающей по глубине	Убывающей по глубине
20	0,10	0,01
30	0,16	0,02
40	0,22	0,05
50	0,30	0,1
60	0,38	0,17
70	0,50	0,28
80	0,66	0,44
85	0,78	0,55
90	0,95	0,72
95	1,28	1,03

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

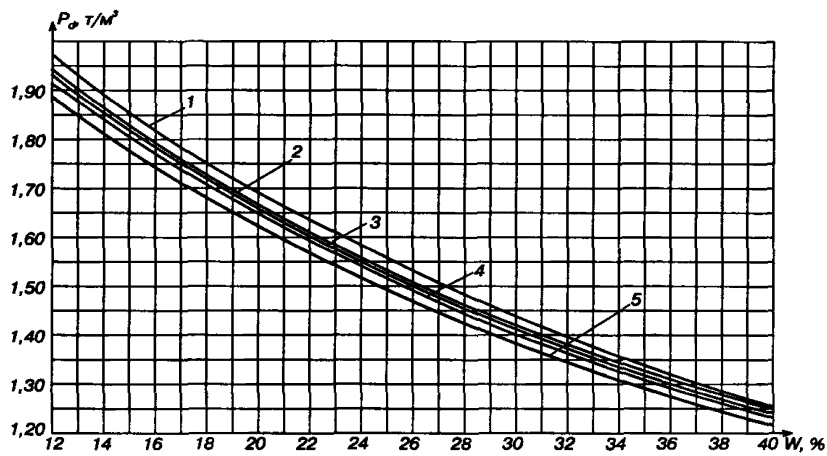


Рис. П.4. Графики зависимости возможного уплотнения грунта от его естественной влажности

1 - глины; *2* - суглинки; *3* - супеси; *4* - пески; *5* - чернозёмы.
Примечание: Зависимость $P_d = f(W)$ рассчитана при значениях плотности частиц грунтов f_s, равных 2,74; 2,70; 2,68; 2,66; 2,60 т/м³ соответственно для глин, суглинков, супесей, песков, грунтов с примесью органических включений (чернозёмов)

ГРАФИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УПЛОТНЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИНАМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

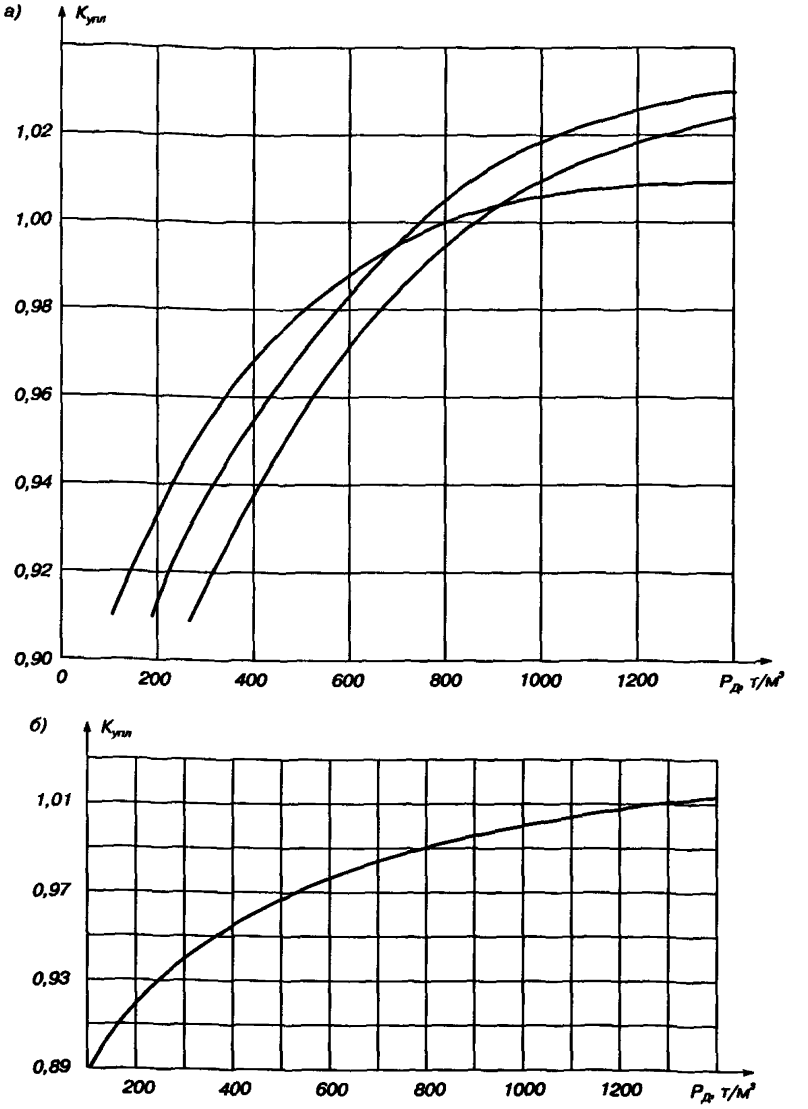


Рис. П. 5:

а - для насыпей свежеотсыпанных: *1* - пески пылеватые, *2* - пески средней крупности и крупные, *3* - пески пылеватые; *б* - для насыпей, возраст которых от 1 до 12 месяцев

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маслов Н.Н.* Основы инженерной геологии и механики грунтов: Учебник для вузов. - М.: Высш. школа, 1982. - 511 с
2. *Гонтарь М.В., Кожевников А.П., Луцкий С.Я.* и др. Управление технологическими процессами при строительстве земляного полотна.// Транспортное строительство, 1998, № 7, с. 2 - 6.
3. *Луцкий С.Я., Кежковски Т., Пономарёв А.В.* Интенсивная технология строительства армированных земляных сооружений.// Подземное пространство мира, 2001, № 4, с. 40 - 46
4. Пособие по технологии сооружения земляного полотна железных дорог (в развитие СниП 3.06.02 - 86). Вельск: ПКТИтрансстрой, 1993.
5. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. М.: Информавтодор, 2004.
6. *Шахунянц Г.М.* Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. 479с.
7. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. - 288 с.
8. Методические рекомендации по разработке выемок в глинистых грунтах влажностью выше оптимальной и использованию этих грунтов для возведения насыпей автомобильных дорог во II и III дорожно-климатических зонах. Союздорнии. М., 1988.
9. *Леонович И.И., Вырко Н.П.* Механика земляного полотна. Минск, "Наука и техника", 1975. 232 с.
10. *Хархута Н.Я., Васильев Ю.М.* Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 284 с.
11. СНиП 2.05.02 - 85 "Автомобильные дороги".
12. *Луцкий С.Я., Долгов Д.В.* Интенсивная технология строительства.// Строительная техника и технологии, 2005, № 1, с. 86 - 92.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

1. Основные положения методики 5
2. Параметры интенсивной технологии возведения земляных сооружений 7
3. Расчёт осадки слабой толщи основания с учётом интенсивной технологии 9
3.1. Методика расчетов 9
3.2. Примеры расчёта осадки насыпи на слабом основании при применении интенсивной технологии на реальных объектах 12
4. Оценка устойчивости слабого основания 30
4.1. Методика расчётов 30
4.2. Примеры оценки устойчивости слабого основания 35
5. Особенности определения устойчивости насыпи на слабом основании 42
6. Выбор геосинтетического материала при интенсивной технологии 46
7. Прогноз во времени осадки насыпи на слабом основании 54
7.1. Методика расчётов 54
7.2. Пример расчета времени прохождения осадки 56
8. Взаимодействие интенсивной технологии с устройством дренажа 58
9. Взаимодействие интенсивной технологии с устройством дренажных прорезей в слабом основании 61
10. Конструктивно-технологические решения для ускорения осадки и обеспечения устойчивости слабого основания 65
10.1. Песчаные сваи 65
10.2. Вертикальные дрены 65
10.3. Пригрузочные бермы 67
11. Сооружение земляного полотна на болотах 69
11.1. Общие положения 69
11.2. Технологическая схема устройства насыпи на болотах типа I 70
12. Мониторинг интенсивных технологических процессов возведения насыпи на слабых грунтах 76
12.1. Контроль интенсивных технологических параметров 76

12.2. Управление технологическими процессами 79
12.3. Анализ изменения деформационных и прочностных характеристик грунтов слабого основания при интенсивной технологии 82
13. Расчёт экономического эффекта применения интенсивной технологии.....86

Приложение 1. Инженерно-геологические характеристики грунтов слабого основания 89
Приложение 2. Технические характеристики вибрационных катков 90
Приложение 3. Значения коэффициента *N* в зависимости от степени консолидации *U*.....91
Приложение 4. Зависимость возможного уплотнения грунта от его естественной влажности ... .91
Приложение 5. Графики для определения коэффициента уплотнения песчаных грунтов по результатам динамического зондирования.....92
Литература 93

С.Я. Луцкий, Э.С. Спиридонов, В.И. Сбитнев, Д.В. Долгов, А.В. Пономарев

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СЛАБЫХ ОСНОВАНИЯХ

Шеф-редактор Центра «ТИМР»
Н.Н. Смирнов

Обложка художника **С.А. Груздева**

Компьютерный набор **Н.П. Гашникова**

Компьютерная верстка **В.В. Мушников**

ЛР № 062784 от 08.09.98

Информационно-издательский центр «ТИМР»
129327, Москва, ул. Ленская, д. 2/21
E-mail: gost.e-ecolog.ru

Подписано к печати 19.06.2005 г. Формат 60x90 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура "Таймс".
Печать офсетная. Объем 6,0 п.л. Цена свободная.

Отпечатано в типографии МКЖТ
107078, Москва, Басманный пер., д. 6

gost.e-ecolog.ru