

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БОЛОТАХ

### 1.1. Типы болот

Болото представляет собой избыточно увлажненную территорию, сложенную торфяными грунтами. Избыток влаги обычно связан с рельефом местности, с наличием поверхностных водоемов, подтоплением водами рек, притоком грунтовых вод, превалярованием атмосферных осадков над испарением, а также и с наличием влагоемкого торфяного слоя, который обладает огромной впитывающей способностью и способен удерживать влагу в 17-27 раз больше своей массы в воздушно-сухом состоянии.

Болота распространены в северных районах страны, где количество выпадающих осадков преваляют над испарением. Разнообразие природных условий образования болот определило также и большое количество их видов и типов, для которых проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог имеет свои специфические особенности.

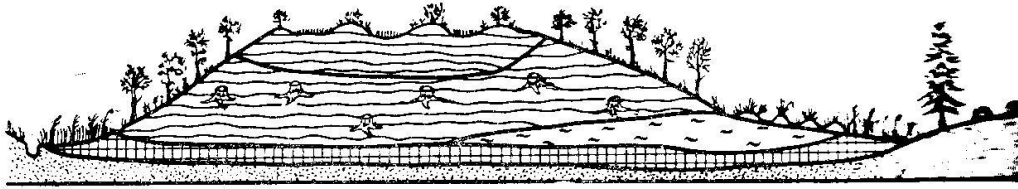
По условиям расположения и увлажнения различают два основных вида болот: верховые и низовые.

*Верховые* болота образуются при застое выпавших атмосферных осадков на водораздельных участках и на пологих склонах с малыми уклонами. Заболачивание сухих участков местности распространено в северных районах лесной зоны России. Неблагоприятные условия испарения (затенение почвы, отсутствие доступа света и ветра) способствуют появлению мха. Образование торфа приводит к изменению водного баланса поверхностных слоев, постепенной смене растительности на более влаголюбивые виды и поверхность верхового болота по мере зарастания и утолщения торфа повышается. Середина большого сфагнового болота нередко возвышается над краями на 6-8 м (рис. 1.1).

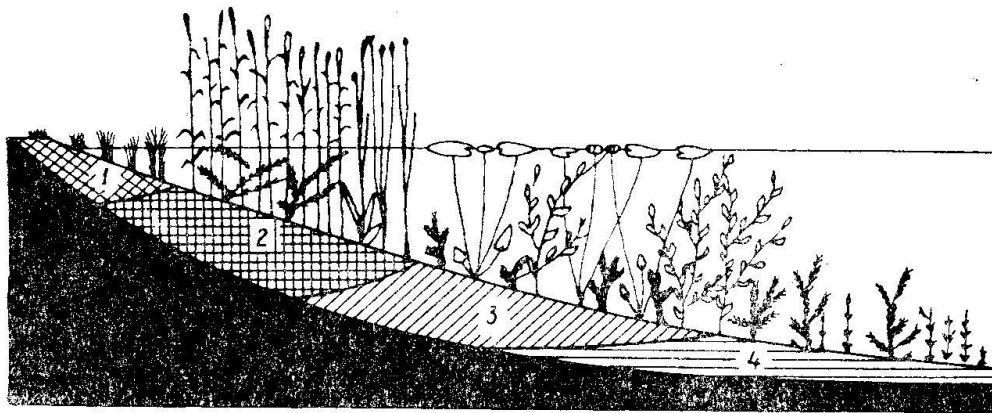
*Низовые* болота образуются в результате зарастания водоемов (озер, медленно текущих рек). Зарастание водоемов от берегов к середине – характерный процесс лесной зоны для относительно неглубоких озер с пологими берегами (рис. 1.2).

Отмирающие остатки растительности оседают на дно, постепенно повышая его за счет образования ила – оседающих глинистых

отложений, а также сапропеля – отложений, образующихся в стоячих водоемах из остатков обитающих в них микроскопических животных, растений и продуктов их жизнедеятельности.

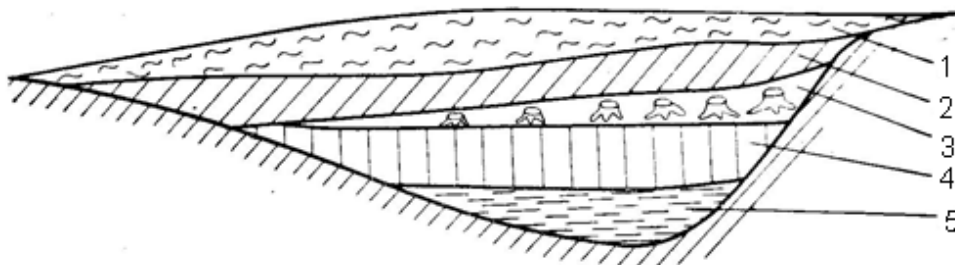


*Рис.1.1. Моховое сфагновое болото*



*Рис.1.2. Процесс зарастания водоема и образования торфа: 1 – осоковый торф; 2 – тростниковый торф; 3 – сапропелевый торф; 4 – сапропель*

На относительно глубоких участках водоема плавающая растительность постепенно затягивает значительную часть его поверхности сплошным зыбким ковром – сплавиной, образованной сплетенными корневищами плавающих растений и мхами.



*Рис. 1.3. 1 – сфагновый торф; 2 – осоковый торф; 3 – древесный торф; 4 – тростниковый торф; 5 – сапропель*

В связи с последовательной сменой в процессе формирования болот торфообразующих растений торфяные образования обычно имеют слоистое строение (рис. 1.3).

В торфах всегда содержатся минеральные частицы, количество которых определяет их зольность (содержание золы). На низовых болотах зольность торфов достигает 12-15%. Плотность торфов зависит от степени их разложения. Мало разложившийся торф имеет относительно невысокую плотность 0,6-0,7 т/м<sup>3</sup>, сильно разложившиеся – до 1,1 т/м<sup>3</sup>.

Одними из основных характеристик болота являются: его глубина – расстояние по вертикали от поверхности до прочного подстилающего минерального слоя (слабая толща); наличие слоистости (толщина и физико-механические свойства слоев); условия отжатия воды из толщи при ее уплотнении; очертание кровли пород, подстилающих слабую толщу; наличие перекрывающих прочных грунтов; положение уровня грунтовых вод.

По особенностям строения слабые толщи следует классифицировать в соответствии с табл. 1.1.

Таблица 1.1

Классификация слабой толщи по строению

Т Тип толщи	Характеристика толщи	Подтип толщи (по условиям отжатия из нее воды под нагрузкой)	Вид толщи (по общей мощности)	Разновидность (по наличию пере- крывающего слоя)
I	Выдержанная по мощности, одно- слойная	А. С односторонним дренированием	а. Маломощная б. Большой мощ- ности	1. Свободная 2. Погребенная
II	Выдержанная по мощности слоев, многослойная	Б. С двухсторонним дренированием		
III	Не выдержанная по мощности, одно- слойная	В. Со сложным дре- нированием		
I	Не выдержанная по мощности, много- слойная			

**Примечания:**

1. Выдержанной по мощности следует называть слабую толщу, мощность которой в пределах поперечника земляного полотна меняется не более чем на 10 %. В противном случае толща называется невыдержанной по мощности.

2. Однослойной называется толща, сложенная слабым грунтом одного подвида (одного наименования).

3. При наличии недренирующих подстилающих грунтов дренирование толщи считается односторонним, при наличии дренирующих подстилающих грунтов - двусторонним, а при наличии в пределах толщи дренирующих прослоек - сложным.

4. Маломощной называется слабая толща, мощность которой не превышает полуширины насыпи по подошве.

Разработанная Н.П. Кузнецовой и И.Е. Евгеньевым инженерная классификация болот, принятая при проектировании дорог, предполагает деление болот на три основных типа:

- 1-й тип – болота, сплошь заполненные торфом и другими болотными отложениями устойчивой консистенции, сжимающиеся под весом возведенных на них насыпей;
- 2-й тип – болота, сплошь заполненные торфом и другими болотными отложениями, различной консистенции, в том числе и выдавливающиеся из-под возведенных на них насыпей;
- 3-й тип – болота, заполненные илом и водой и, как правило, имеющие торфяную славину.

Разработанная проф. И.Е. Евгеньевым применительно к этим типам инженерная классификация болот делит их на типы, различающиеся по характеру деформаций под нагрузкой (табл. 1.2).

## 1.2. Типы болотных грунтов и их свойства

**Торф** – осадочная порода, содержащая большое количество органических веществ, образованная в результате отмирания болотной растительности при избыточном количестве влаги и недостаточном доступе воздуха.

Для торфа характерна высокая влагоёмкость и природная влажность в естественном состоянии (в пределах 150-1000%). Твердое вещество высушенного торфа состоит из не вполне разложившихся растительных остатков (растительного волокна, продуктов разложения растительных остатков, гумуса и неорганических примесей).

Механические свойства торфов зависят от их структурных особенностей, определяемых степенью волокнистости, плотностью, влажностью и составом торфообразователей.

**Сапропели** представляют собой озерные отложения, образующиеся в водоемах в результате отмирания животных и растительных организмов и оседания минеральных частиц, заносимых водой и ветром. Механические свойства сапропелей зависят от их структурных особенностей, состава и плотности - влажности в природном состоянии.

**Илы** представляют собой глинистые горные породы в начальной стадии формирования, которые образовались в виде структурного осадка в воде при наличии микробиологических процессов и имеют в природном залегании влажность, превышающую влажность на границе текучести и коэффициент пористости, превышающий 1.

Таблица 1.2

## Инженерная классификация болот по И.Е. Евгеньеву

Характеристики	Типы болотных грунтов					
	I		II		III	
	I-A	I-B	II-A	II-B	III-A	III-B
	Осушен- ныйили плотный	Рыхлый полностью- водонасы- щенный	Плот- ный	Водона- сыщен- ный	Уплот- ненный	Жид- кий
Входящие в грунты	Торф		Минерализован- ный торф, органические илы,(сапропель)		Органо-мине- ральный ил, зоторфован- ныйгрунт	
Содержание волокон, крупнее 0,25 мм, % по объему	60		60-10		10	
Содержание минеральных веществ, % помассе	2-12		10-40		40	
Структура	Губчато-волокнутое строение, высокое струк- турное сцепление		Маловолокнис- тая,раздроблен- ная или гелеоб- разнаяструктура		Слабоагрегат- ная или аморф- наяструктура	

Основными характеристиками болотных грунтов, определяющих их сопротивление сдвигу, являются сцепление и угол внутреннего трения, зависящие от плотности и влажности, устанавливаемые путем сдвиговых испытаний.

Сопротивление грунта сдвигу находят по формуле:

$$S_{pw} = p \cdot \tan \varphi_w + c_w, \quad (1.1)$$

где  $\varphi_w$  – угол внутреннего трения грунта при влажности  $W$  в момент сдвига;

$c_w$  – величина структурного сцепления грунта при влажности грунта  $W$ ;

$p$  – нормальное напряжение при сдвиге.

Для расчетов осадки грунтов под воздействием внешней нагрузки используются модуль деформации и модуль осадки, определяемые в лабораторных условиях путем испытаний образцов с ненарушенной структурой в компрессионных приборах.

Модуль деформации грунта находят по формуле:

$$E_{pi} = \frac{P_i}{\lambda_i}, \quad (1.2)$$

где  $P_i$  – сжимающая нагрузка;

$\lambda_i$  – относительная деформация при этой нагрузке.

Относительная деформация, выраженная в промиллях, называется модулем осадки ( $e_{pi}$ ):

$$e_{pi} = \frac{\Delta h_i}{h}, \quad (1.3)$$

где  $\Delta h_i$  – деформация образца;

$h$  – начальная высота образца.

Особенностью слабых грунтов является нелинейность зависимости модуля деформации и модуля осадки от нагрузки.

На характер осадки и скорость её прохождения влияют: исходное состояние грунта, его фильтрационные и деформационные свойства, а также величина уплотняющей нагрузки на грунт и режим её приложения.

Во многих случаях еще недостаточно знать полную осадку насыпи, но также необходимы сведения и о времени консолидации слабого основания. Действительно, при составлении проекта органи-

зации строительства нужно иметь точное представление о том периоде после сооружения земляного полотна, спустя который можно устраивать дорожную одежду, не опасаясь ее просадок и разрушения. Время осадки насыпи в результате сжатия слабого основания во многих случаях оказывается столь значительным, что автомобильная дорога может быть построена в установленные сроки лишь в результате реализации специальных инженерных мероприятий по ускорению осадки слабого основания.

При сжатии водонасыщенных грунтов под действием веса насыпи происходит процесс выжимания практически несжимаемой воды из пор грунта. При этом сжимающим напряжениям противостоят: гидродинамическое сопротивление выжимаемой воды, сопротивление деформаций пленочной влаги, облегающей грунтовые частицы и сопротивления, обусловленные перемещением самих грунтовых частиц. Эти процессы развиваются весьма медленно и, поэтому, темп сжатия водонасыщенного грунта определяется соотношением между скоростью деформации скелета грунта и скоростью выжимания грунтовой воды. В начальный период приложения внешней нагрузки сжимающие напряжения воспринимаются главным образом практически несжимаемой грунтовой водой и процесс деформации слабого основания определяется исключительно скоростью выжимания грунтовой воды. В конечной стадии уплотнения, определяющей становится скорость деформации скелета грунта.

Одномерная консолидация слабых грунтов изучается в условиях компрессионного опыта. Методика проведения консолидационных испытаний грунтов тестирована (ГОСТ 12248-96). Некоторые её дополнения, учитывающие специфику поведения слабых грунтов, изложены в «Пособии по проектированию земляного полотна на слабых грунтах».

В результате обработки испытаний строится консолидационная кривая грунта в виде  $\lambda = f(t)$

или  $\lambda = f(\lg t)$  (рис. 1.4).

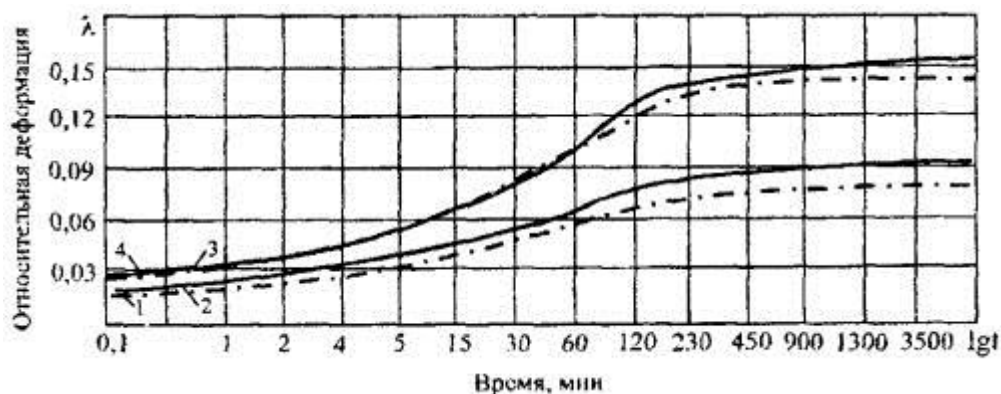


Рис. 1.4. Консолидационные кривые ила: 1 – фильтрация двусторонняя при  $P_{упл} = 0,15$  МПа; 2 – односторонняя фильтрация при  $P_{упл} = 0,15$  МПа; 3 – фильтрация двусторонняя при  $P_{упл} = 0,3$  МПа; 4 – односторонняя фильтрация при  $P_{упл} = 0,3$  МПа

Удобнее всего для практических целей пользоваться кривой консолидации, построенной в полулогарифмическом масштабе.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОРОГ В БОЛОТИСТОЙ МЕСТНОСТИ

### 2.1. План и продольный профиль дороги

В связи с существенным увеличением стоимости строительства дорог на болотах одним из основных проектных решений является попытка их обойти. Вследствие особенностей территории это не всегда представляется возможным. Кроме того, при проектировании дорог с интенсивным движением удлинение дороги при устройстве обхода может оказаться экономически нецелесообразным из-за значительного увеличения площади дорогостоящей дорожной одежды и перепробега автомобильного транспорта.

Поэтому во многих случаях приходится пересекать болота. Варианты трассы намечают на основе детального изучения крупномасштабных карт, материалов аэро- и космических съемок, полевых обследований и изысканий.



Наиболее выгодными местами пересечения болот являются участки с минимальными шириной и глубиной болота. Такое сочетание не всегда возможно. Вследствие этого приходится назначать дополнительные варианты с большей шириной болота, но с меньшей мощностью и более высокими физико-механическими свойствами торфяных грунтов. При пересечении сплавинных болот следует избегать мест со значительными поперечными уклонами минерального дна, где существует опасность сползания земляного полотна. При назначении вариантов трассы в плане всегда надо избегать значительного удлинения трассы и увеличения ее извилистости.

При проектировании продольного профиля дорог на участках болот необходимо учитывать категорию дороги, капитальность дорожной одежды, мощность и физико-механические свойства торфяных грунтов, гидрологические и гидрогеологические особенности болота, возможные проектные решения по конструкции земляного полотна, наличие водопропускных сооружений.

Так как поверхность болот имеет небольшие уклоны, проектную линию вне зоны влияния водопропускных сооружений проектируют в насыпи горизонтальной или с небольшими продольными уклонами. Минимальную высоту насыпи следует определять по формуле:

$$h_{min} = h_e + w, \quad (2.1)$$

где  $h_e$  – глубина длительно стоящих поверхностных вод, м;

$w$  – минимальное возвышение поверхности покрытия над уровнем длительно стоящих поверхностных вод, м.

Если болото расположено на затопляемой во время паводков пойме, то минимальную отметку бровки насыпи рассчитывают по формуле:

$$H_{min} = PУВВ + \Delta Z_H + h_{наб} + \Delta, \text{ м}, \quad (2.2)$$

где РУВВ – расчетный уровень высоких вод;

$h_{наб}$  – высота набега волны на откос, определяется по формуле:

$$h_{наб} = \frac{4,3 h_B}{m}$$

$\Delta Z_H$  – подпор у насыпи;

$\Delta$  – запас, равный 0,5 м.

Минимальная высота малых мостов может быть рассчитана по формуле:

$$H_M = 0,88H + M + h_{\text{кон}}, \quad (2.3)$$

где  $H$  – подпор;

$h_{\text{кон}}$  – конструктивная высота пролетного строения;

$M$  – минимальное возвышение низа пролетного строения над уровнем воды (0,5 м).

Минимальная высота насыпи у водопропускных труб рассчитывается по формуле:

$$h_{\text{min}} = h_m + \Delta + 0,5 + h_{\text{до}}, \quad (2.4)$$

где  $h_m$  – высота трубы в сету;

$\Delta$  – толщина стенки трубы;

$h_{\text{до}}$  – толщина дорожной одежды;

0,5 – минимальная толщина слоя грунта над трубой.

При выборе водопропускного сооружения предпочтение следует отдавать мостам. Искусственные сооружения целесообразно располагать у края болота, где толщина слоя торфа невелика. При этом в случае необходимости приходится предусматривать устройство подводящих и отводящих русел.

При пересечении сплавинных болот при наличии течения воды размеры отверстий мостов назначают с учетом расхода и глубины потока. У устоев мостов в зоне конусов и на подходе к ним следует применять полное выторфовывание и использовать для укрепления откосов каменную наброску.

## 2.2. Земляное полотно и дорожная одежда

При проектировании земляного полотна для сохранения в основании слабых грунтов необходимо обеспечить:

- устойчивость основания (недопущение боковых сдвигов и выдавливания слабых грунтов);
- завершение основной части осадки до начала строительства дорожной одежды (для капитальных дорожных одежд – не менее 90% от полной осадки; для дорожных одежд облегченного типа – не менее 80%);

– ограничение до допустимых значений упругих колебаний насыпи при проезде транспортных средств (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1

Минимальная высота насыпи (м) на торфяных грунтах в зависимости от типа дорожной одежды

Мощность слабого основания, м	Тип дорожной одежды		
	капитальный	облегченный	переходный
1	2,0	1,5	1,2
2	2,5	2,0	1,5
4	3,0	2,5	2,0
6	3,0	3,0	2,5

При проектировании дорожных одежд модуль упругости рабочего слоя следует определять с учетом наличия слабого грунта в основании насыпи с использованием формулы:

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_{\text{сл}}}{\frac{2}{\pi} \left[ \arctg 1,5 \cdot \frac{(h_{\text{н}} + H_{\text{сл}})}{D} - \left( 1 - \frac{E_{\text{сл}}}{E_{\text{н}}} \right) \arctg 1,5 \frac{h}{D} \right]}, \quad (2.5)$$

где  $E_{\text{сл}}$  – модуль упругости слабого грунта в его расчетном состоянии под насыпью;

$h_{\text{н}}$  – толщина насыпи;

$H_{\text{сл}}$  – мощность слабой толщи;

$D$  – расчетный диаметр отпечатка колеса;

$E_{\text{н}}$  – модуль упругости грунта насыпи.

### 3. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ НАСЫПИ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

Под устойчивостью насыпи на слабом основании подразумевается отсутствие боковых сдвигов и выпирания грунтов, характеризующихся небольшими значениями сцепления и угла внутреннего трения. Возникающие в них касательные напряжения не должны превышать сопротивление грунтов сдвигу.

В качестве показателя устойчивости насыпи на слабом основании используется коэффициент безопасности, рассчитываемый по формуле:

$$K_{без} = P_{без} / P_{расч}, \quad (3.1)$$

где  $P_{без}$  – безопасная нагрузка на основание, МПа;

$P_{расч}$  – расчетная нагрузка на основание, МПа.

Коэффициент безопасности должен быть не меньше 1. Его определяют для двух схем приложения нагрузки к слабому основанию:

- 1) быстрая отсыпка насыпи на полную высоту с учетом ее возможной осадки;
- 2) медленная отсыпка насыпи, в процессе которой в результате уплотнения и уменьшения влажности грунтов возрастают их прочностные характеристики.

Для каждого из этих режимов определяются свои значения безопасной и расчетной нагрузок.

В зависимости от результатов оценки устойчивости основания в его природном состоянии относят к одному из трех типов:

- I – основания, не требующие специальных мер по обеспечению устойчивости;
- II – основания, для обеспечения устойчивости которых достаточно ограничить режим отсыпки насыпи;
- III – основания, требующие применения специальных мероприятий для обеспечения их устойчивости (исключение бокового выпирания слабых грунтов).

Безопасная нагрузка для условий быстрой отсыпки насыпи определяется по формуле:

$$P_{без}^{нач} = \left[ \frac{(C_{нач} + \gamma_{ср} \cdot tg \varphi_{нач})}{\beta} \right], \quad (3.2)$$

где  $C_{нач}$  и  $\varphi_{нач}$  – сцепление и угол внутреннего трения грунта слабой толщи при его природной плотности-влажности;

$\gamma_{нач}$  – средневзвешенный объемный вес грунта слабой толщи (в необходимых случаях с учётом взвешивания), расположенной выше горизонта  $Z$ ;

$Z$  – глубина рассматриваемого горизонта от поверхности земли;

$\beta$  – коэффициент, устанавливаемый по графикам ПРИЛОЖЕНИЯ 1 для трапецеидальной формы эпюры нагрузки  $2a/B$  и относительной глубины  $Z/b$ .

Максимальное значение коэффициента  $\beta$  можно также определить по формуле:

$$\beta = 0.297 - 0.018 \log 2a/H - 0,006. \quad (3.3)$$

Расчетная нагрузка от насыпи трапецеидальной формы определяется по формуле:

$$P_{расч} = \gamma_n (h_{расч} + S_{кон}), \quad (3.4)$$

где  $\gamma_n$  – удельный вес грунта насыпи;

$S_{кон}$  – конечная осадка насыпи;

$h_{расч}$  – расчетная высота насыпи.

Если соблюдается условие:

$$K_{без}^{нач} = \frac{P_{без}^{нач}}{P_{расч}} > 1, \quad (3.5)$$

то основание относят к I типу по устойчивости и никаких дополнительных проверок устойчивости не проводят.

В случае, если  $K_{без}^{нач} < 1$ , для отнесения ко II или III типу основания по устойчивости следует определить безопасную нагрузку при медленной отсыпке насыпи по выражению:

$$P_{без}^{кон} = \left[ \frac{(c + \gamma_{ср} \cdot Z \cdot \tan \varphi)}{\beta} \right], \quad (3.6)$$

где  $c$  и  $\varphi$  – условные сцепление и угол внутреннего трения, получаемые при консолидированно-дренированных испытаниях на сдвиг;  
 $B$  – та же функция, что и при расчете на быструю отсыпку, но принимаемая в зависимости от  $\varphi$ .

Возможность обеспечения устойчивости оснований II типа обусловлена способностью слабых грунтов уплотняться и упрочняться по мере постепенной передачи на них нагрузки и прохождения процесса консолидации.

Коэффициент безопасности при медленной отсыпке насыпи вычисляют по формуле:

$$K_{без}^{кон} = \frac{P_{без}^{кон}}{P_{расч}}. \quad (3.7)$$

В зависимости от полученного коэффициента безопасности определяется: тип основания по степени устойчивости и необходимость дополнительных мероприятий для обеспечения устойчивости основания (табл. 3.1).

Если  $K_{\text{без}}^{\text{кон}} < 1$ , то основание должно быть отнесено к III типу. При одновременном соблюдении условий  $K_{\text{без}}^{\text{нач}} < 1$  и  $K_{\text{без}}^{\text{кон}} > 1$  – основание относят ко II типу.

Таблица 3.1

Тип основания по коэффициенту безопасности

Тип основания	Определяющий признак	Характеристика степени Устойчивости	Преобладающие деформации грунта наиболее опасного слоя	Возможность использования слабой толщи в качестве основания
1	2	3	4	5
I	$K_{\text{без}}^{\text{нач}} \geq 1$	Устойчивость обеспечена при любой скорости отсыпки насыпи	Сжатие	Можно использовать в качестве основания
II	$K_{\text{без}}^{\text{нач}} < 1$ $K_{\text{без}}^{\text{кон}} \geq 1$	Устойчивость при быстрой отсыпке не обеспечена, но обеспечена при медленной отсыпке	При быстрой отсыпке - сдвиг (выдавливание), при медленной отсыпке - сжатие	Можно использовать в качестве основания при медленной отсыпке насыпи
III	$K_{\text{без}}^{\text{кон}} < 1$	Устойчивость не обеспечена ни при каких режимах отсыпки	Сдвиг (выдавливание)	Без конструктивных мероприятий в качестве основания использовать нельзя. Нужно удалить слабый слой или изменить конструкцию насыпи