

634.0.3  
Л-47

И. И. ЛЕОНОВИЧ, Т. К. БОГДАНОВИЧ

# ПОСОБИЕ

по расчету земляного полотна  
автомобильных лесовозных дорог  
на слабых основаниях

МИНСК 1973

634.0.3

Л-47

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени С. М. КИРОВА

И. И. Леонович, Т. К. Богданович

# ПОСОБИЕ

по расчету земляного полотна автомобильных  
лесовозных дорог на слабых основаниях

*Одобрено секцией лесозаготовок и лесохимии  
научно-технического Совета Министерства  
лесной и деревообрабатывающей промышленности БССР*

Библиотека БГТУ



0000000339610b

БИБЛИОТЕКА БТИ  
ИМЕНИ С. М. КИРОВА

МИНСК 1973

445 139

УДК 625. 711.84

ПОСОБИЕ ПО РАСЧЕТУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА  
АВТОМОБИЛЬНЫХ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ НА  
СЛАБЫХ ОСНОВАНИЯХ

И.И.Леонович, Т.К.Богданович, Минск, 1973г.

В книге рассматриваются вопросы, разработанные на основе обобщения опыта проектирования автомобильных дорог на участках слабых грунтов. Приводятся методика полевых и лабораторных испытаний физико-механических свойств слабых грунтов; результаты экспериментальных исследований напряженного состояния и длительности осадки основания земляного полотна, полученные методом моделирования. Даны некоторые рекомендации по выбору конструкции и технологии возведения земляного полотна.

Пособие предназначено для студентов лесоинженерной специальности, а также для проектных организаций лесной промышленности и лесного хозяйства.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В лесной промышленности СССР в настоящее время эксплуатируется около 3 тыс. автомобильных лесовозных дорог общей протяженностью более 100 тыс. км. Для освоения новых лесных районов и обеспечения действующих лесозаготовительных предприятий ежегодно строится около 8 тыс. км магистральных и 30 тыс. км подъездных путей.

Строительство лесовозных дорог неразрывно связано с возведением земляного полотна на заболоченных и переувлажненных основаниях. Земляное полотно, построенное на таких основаниях, работает по-особому. Под действием собственного веса и временных нагрузок оно оседает, меняет свое очертание и может потерять свою устойчивость.

Для правильного назначения конструкции земляного полотна, выбора наиболее оптимальных его параметров необходимо располагать надежными методами расчета величины конечной осадки и затухания деформации сжатия во времени. Последнее можно определить методом электрогидродинамического моделирования в зависимости от физико-механических свойств грунтов, величины уплотняющей нагрузки и мощности уплотняемого слоя.

В настоящем пособии изложены вопросы применения линейно-деформируемой среды к болотным грунтам, приводятся практические приемы нахождения интенсивности осадки насыпи методом ЭГДА. Приведены данные об изменении осадки во времени, полученные моделированием при различных значениях коэффициента фильтрации торфяного основания, ширины и высоты насыпи.

Пособие предназначается для студентов лесинженерных факультетов, изучающих курс "Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог", а также для инженерно-технических

работников проектных и производственных организаций лесной промышленности. Оно несомненно может быть полезным и для других специалистов, занимающихся вопросами строительства инженерных сооружений на слабых грунтах.

При подготовке пособия авторами были использованы теоретические исследования и справочно-нормативные разработки СоюздорНИИ (В.Д.Казарновский, Ю.Л.Мотылев), ЦНИИС (И.И. Викторов, Л.И. Кузнецов), БелдорНИИ (И.Е.Евгеньев, В.Н.Яромко), Калининского политехнического института (Л.С.Амарян, А.А.Ткаченко), Московского автодорожного института (В.Ф.Бабков, Н.Н.Маслов), Сибирского автодорожного института (М.И.Кудрявцев), БелНИИ мелиорации и водного хозяйства (П.А.Дрозд), ЦНИИМЭ, Гипролестранса (М.А.Шапошников), Ленгипротранса, Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта, Производственного НИИ инженерных изысканий в строительстве (А.Я.Рубинштейн), Московского гидро-мелиоративного института и некоторых других научных и проектных организаций.

Пособие рассмотрено на кафедре сухопутного транспорта леса и дорожных машин и на секции лесозаготовок и лесохимии научно-технического Совета Министерства лесной и деревообрабатывающей промышленности БССР.

За ценные советы сотрудников кафедры и членов секции авторы весьма благодарны.

## Глава I. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛАБЫХ ГРУНТОВ

### I. Основные признаки слабых грунтов

К слабым грунтам относятся преимущественно молодые отложения минерального и органического происхождения, в которых высокая степень иммобилизации влаги и заземленного воздуха, обусловленная высоко пористой и активной структурой частиц и коллоидных агрегатов, препятствует плотной упаковке и возникновению прочных связей между ними, а также способствует микробиологическому распаду с изменением вещественного состава твердой фазы по глубине и на различных фазах формирования [4]. Эта формулировка является результатом анализа, обобщения и, в некоторой степени, развития формирующихся в течение многих лет взглядов ряда исследователей (Н.А.Цытович, Н.Я.Денисов, А.К.Ларионов, В.Д.Ломпадзе, Г.В.Сорокина, А.Я.Рубинштейн, Л.С.Амарян и др.), которые довольно объективно, как теоретически, так и экспериментально, обосновали отдельные аспекты данной проблемы и позволили перейти к общей ее постановке. Она дает комплексную оценку слабым грунтам с позиций генезиса, твердой фазы, физических свойств и структуры, поведения грунтов как деформируемого тела. Механические свойства системы, прочность и сжимаемость, рассматриваются как следствие физико-химических особенностей системы.

Из приведенного определения следует, что для слабых грунтов характерны наличие высокопористых водонасыщенных частиц и агрегатов, ранняя стадия формирования с учетом протекания микробиологических процессов. Подобной общностью основных признаков обладают такие системы, как торфяные грунты, илы органические (сапрпели) и минерального происхождения (глинистые, суглинистые, супесчаные) и пльвуны.

Указанным требованиям не удовлетворяют всевозможные минеральные грунты (водонасыщенные глины и пески, просадочные и оттаивающие минеральные грунты и др.), хотя в отдельных случаях они по состоянию, особенно при избыточном увлажнении, могут иметь довольно низкие параметры по прочности

и деформируемости.

Торф — относительно молодое геологическое образование, создающееся в результате отмирания болотной растительности при избыточном количестве влаги и недостаточном доступе воздуха. По внешнему виду он представляет собой волокнистую или аморфную массу. Сухое вещество торфа состоит из не вполне разложившихся растительных остатков, темного бесструктурного вещества (гумуса) и неорганических примесей (зола).

Сапропели представляют собой озерные отложения, образующиеся в водоемах в результате отмирания заселяющих их животных и растительных организмов и оседания минеральных частиц, заносимых водой и ветром.

В торфяных болотах сапропели нередко образуют придонные слои. Сапропелевые отложения могут быть в текучем состоянии (преимущественно современные озерные отложения верхних слоев), в пластичном (залегающие под торфяным пластом небольшой мощности), в полутвердом и твердом (наиболее глубокие сапропелевые отложения, подвергнувшиеся естественному уплотнению).

Илами называются глинистые грунты в начальной стадии формирования, которые образовались как структурный осадок в воде при наличии микробиологических процессов.

Иольдивые глины — послеледниковые четвертичные отложения, особая разновидность морских илов — распространены в северо-западных районах СССР и представлены глинами и суглинками голубого и зеленовато-серого цвета.

Торфы и органические илы являются типичными представителями болотных грунтов. С болотными образованиями сходны некоторые типы солончаков, хотя засоленные грунты имеют ряд особых строительных свойств, из-за которых их принято выделять в отдельную группу.

Слабые грунты, относящиеся к типу связных и водонасыщенных, не могут быть оценены теми же критериями, что и глинистые грунты (по консистенции и пластичности). В природных условиях влажность илов нередко превышает предел текучести, а в торфяных грунтах содержатся неразложившиеся волокна.

Лабораторное определение физико-механических свойств слабых грунтов достаточно сложная и трудоемкая работа,

поэтому большую практическую пользу дает установление взаимосвязи между количественными показателями состояния грунта и качественными характеристиками условий его залегания. Такая взаимосвязь используется в классификационных схемах. Классификация слабых грунтов дает возможность выделить сходные по тем или иным признакам группы, в пределах которых могут найти применение однородные методы проектирования и строительства.

## 2. Дорожно-строительная классификация торфяных грунтов

В зависимости от состава и состояния торфяных грунтов их физико-механические свойства могут меняться в широком диапазоне. Непосредственное определение в каждом конкретном случае физико-механических характеристик и установление их расчетных значений для проектирования инженерных сооружений всегда сопряжено с большими трудностями. Поэтому крайне необходимо иметь строительную классификацию торфа, с помощью которой можно было бы по некоторым частным признакам судить о совокупности всех физико-механических свойств торфяных грунтов. Наличие такой классификации позволило бы уже на ранних стадиях проектирования, не проводя сложных полевых работ и механических испытаний, иметь приближенные значения расчетных характеристик.

Поскольку интересы строителей и торфяников в вопросах классификации различны, весьма обширные и полные классификации торфов, разработанные торфяниками, не устраивают строителей, рассматривающих торф с точки зрения поведения его в основании или составе сооружения.

Первая дорожно-строительная классификация болот была разработана профессором В.И.Курдимовым (1894). В этой классификации рекомендовалось широко использовать торф как несущее основание для железнодорожных насыпей легкого и среднего веса. И только высокие насыпи, возводимые на болоте с жидким торфом, требовалось погружать на минеральное дно.

Первая классификация торфа и болот базировалась на производственном принципе и исходила из конструкции земляного полотна и способа производства работ. Этот принцип сохранен



в последующих предложениях, совершенствовавших и развивавших классификацию В.И.Курдюмова. За последние 40 лет были предложены [43] классификации болот: А.В.Ливеровским (1932), Н.П.Кузнецовой (1936), К.С.Ордуянцем (1939) с модификацией, принятой в технических условиях на проектирование железных дорог (1941), Н.Н.Сидоровым (1948), А.А.Ткаченко (1959), А.М.Силкиным (1961), принята в СНиП П-Д 5-62 и 6-62 (1962), И.Е.Евгеньевым (1964), А.К.Дерцакяном и Б.Д.Макуровым (1965), И.И.Канатовым (1965), В.И.Гусевой (1966), Г.С.Аношкиным (1967) и торфяных оснований М.А.Шапошниковым (1967).

Учитывая, что ряд принципиальных позиций авторов этих классификаций схож, в 1968 году ЦНИИСом и СоюзДорНИИ при участии БелДорНИИ и Архангельского лесотехнического института была разработана классификация слабых грунтов, которая вошла в методические указания по проектированию земляного полотна [26]. В основу указанной классификационной характеристики была положена природная влажность.

Однако механические характеристики торфяных грунтов определяются не только их природной влажностью, но и некоторыми другими показателями.

В последние годы на основе экспериментальных работ, выполненных в Калининском политехническом институте Л.С.Амаряном, в Омском филиале СоюзДорНИИ Г.Г.Тришиным, в БелДорНИИ И.Е.Евгеньевым, в СоюзДорНИИ В.Д.Казарновским, предложена [17] новая классификация (табл.1).

В основу ее положены подтверждаемые практикой факты, свидетельствующие о том, что механические свойства торфяного грунта зависят в основном от трех показателей: природной влажности, зольности и степени разложения. В зависимости от значений этих показателей торфяные грунты делятся на разновидности (по величине природной влажности), группы (по величине степени разложения) и подгруппы (по величине зольности).

Каждой подгруппе соответствует свое значение сопротивления сдвигу и модуля деформации. Кроме того, в классификацию введено деление торфяных грунтов на строительные типы. Обычно, когда речь идет о строительном типе торфяного

Таблица I. Дорожно-строительная классификация торфяных грунтов (по В. Л. Казаряновскому)

Разновидность	Группа	Подгруппа	Расчетные значения механических характеристик				Модуль деформации		Строительный тип грунта
			Степень раздождевания R, %	Зольность Z, %	Сопrotивляемость сдвигу (по крыльчатке) кг/см <sup>2</sup>	в природном залегании	после уплотнения под нагрузкой 0,5 кг/см <sup>2</sup>	Е, кг/см <sup>2</sup>	
Наименование	Природная влажность W <sub>np</sub> , %						0,5	1,0	
	2	3	4	5	6	7	8	9	
Сухой	300	≤ 25	≤ 5	0,49	2,50				А
			> 5	0,42	1,72				
		25-40	≤ 5	0,30	1,25				2,6
			> 5	0,33	1,05	2,4			
Мало-влажный	300-500	> 40	≤ 5	0,19	0,80				2,4-2,0
			> 5	0,26	0,73				
		< 25	≤ 5	0,49-0,31	2,50-1,65				2,6-2,2
			> 5	0,42-0,26	1,72-1,05				

Продолжение

I	2	3	4	5	6	7	8	9
		25-40	≤ 5 > 5	0,30-0,21 0,33-0,19	1,25-0,75 1,05-0,67			
	300- 500	> 40	≤ 5 > 5	0,19-0,10 0,26-0,15	0,80-0,42 0,73-0,42	2,4-2,0	2,6-2,2	Б АБ <sup>x</sup>
Средней влажнос- ти	500- 900	< 25  25-40	≤ 5 > 5	0,31-0,16 0,26-0,16	0,69-0,87 1,05-0,66	2,4-2,0	2,6-2,2	А
		> 40	≤ 5 > 5	0,21-0,10 0,19-0,11	0,75-0,42 0,67-0,35	2,0-1,3	2,2-1,7	Б
			≤ 5 > 5	0,10-0,05 0,15-0,08	0,42-0,21 0,42-0,22			
Очень влажный	900- 1200	< 25  25-40	≤ 5 > 5	0,16-0,11 0,16-0,11	0,87-0,62 0,66-0,46	1,3-1,0	1,7-1,5	А
			≤ 5 > 5	0,10-0,06 0,11-0,08	0,42-0,28 0,35-0,26			

I	2	3	4	5	6	7	8	9
Очень влажный	900- 1200	> 40	≤ 5	0,05-0,03	0,21-0,14	1,3-1,0	1,7-1,5	A
			> 5	0,08-0,05	0,22-0,14			B
Избыточно влажный	1200- 2200	< 25	≤ 5	0,11-0,07	0,62-0,38			A
			> 5	0,11-0,06	0,46-0,20			
		25-40	≤ 5	0,06-0,04	0,28-0,14	1,0-0,4	1,5-1,0	B
			> 5	0,08-0,05	0,26-0,14			
		> 40	≤ 5	0,03-0,01	0,14-0,05			B
			> 5	0,05-0,02	0,14-0,06			

х) При влажности до 400% - относиться к типу А

грунта (или болота), фактически дело сводится к необходимости ответить на вопрос: будет ли этот грунт выдавливаться из-под насыпи или он будет только сжиматься. Это обстоятельство для практики весьма важно, так как оно может определить принцип назначения конструкции земляного полотна и технологии его возведения. Однако этот вопрос не может во всех случаях решаться только на основе данных о свойствах грунта, поскольку на характер работы грунта в основании насыпи существенно влияет и высота насыпи, и ее поперечное очертание, и даже скорость ее воздействия. Поэтому при классификации торфяных грунтов на строительные типы надо ограничиваться какими-либо условиями.

В данной классификации рассматриваются насыпи высотой не более трех метров, имеющие типовой поперечный профиль (трапециевидальное сечение).

При этих условиях торфяные грунты разделяются на три строительные типа: А - торфяные грунты, которые при принятых условиях могут практически сжиматься; Б - торфяные грунты, характер деформации которых будет зависеть от интенсивности передачи на них нагрузки - при малой интенсивности они успевают упрочниться и не выдавливаться, при высокой интенсивности может происходить выдавливание грунта за пределы подошвы насыпи; В - торфяные грунты, которые выдавливаются независимо от условий нагружения ввиду чрезвычайно низкой прочности и малой упрочняемости.

Анализ данных, приведенных в табл. I, показывает, что, хотя зольность может существенно влиять на величину сопротивляемости грунта сдвигу, реальные значения колебаний сопротивляемости сдвигу таковы, что при принятых границах изменения природной влажности грунта в пределах разновидности для определения строительного типа торфяного грунта в соответствии с установленными выше критериями достаточно знать величину природной влажности и степень разложения. Исключением представляет лишь грунт малой влажности (300-500 %) при степени разложения более 40 %, который в зависимости от зольности и влажности может быть отнесен к типу А или Б.

Учитывая это, предлагается [17] упрощенная классификация

(табл.2), которая полезна для предварительной качественной оценки строительных свойств торфяных грунтов.

Таблица 2. Классификация торфа в зависимости от влажности и степени разложения

Наименование разновидности	Природная влажность, %	Степень разложения, %		
		25	25-40	40
		Строительный тип торфяного грунта		
Сухой	300	А	А	А
Маловлажный	300-500	А	А	АБ <sup>х</sup>
Средней влажности	500-900	А	Б	Б
Очень влажный	900-1200	А	Б	Б
Избыточно влажный	1200-2400	А	Б	В

х) К типу А следует относить торфяной грунт при зольности более 5% и влажности менее 400%.

Дополнительную связь физико-механических свойств с общими, в частности геоморфологическими условиями, дает разделение болот по характеру их водного питания, являющееся элементом общей болотоведческой классификационной системы. По условиям питания болота разделяются на верховые, низинные и переходные.

Верховые болота, получающие воду в основном за счет атмосферных осадков, лишены минеральных растворов, необходимых для развития большинства видов растений. Верховые залежи болот сложены, как правило, из моховых торфов (сфагнум, фускум). Наиболее богатую флору имеют низинные болота, питающиеся грунтовыми водами. На низинных болотах торф образуется из деревьев (ольха, береза, ель, ива), травяного покрова (осока, тростник, хвощ) и лишь иногда при крайне высокой степени обводненности - с участием мхов (гипнум, сфагнум). Различается также промежуточный, переходный тип болота, образующийся на контакте низинной и верховой обводненности

при меняющемся режиме питания [15] .

Классификация торфов по геоботаническим признакам и болот по виду водного питания полезны для целей идентификации различных образований, что позволяет более широко использовать существующий опыт строительства в новых проектах.

### 3. Физико-механические характеристики слабых грунтов

Слабые грунты по ряду особенностей резко отличаются от минеральных плотных грунтов, с которыми обычно приходится иметь дело строителям. Несмотря на это торф и ил, независимо от состояния, обладают всеми свойствами, характерными для грунта вообще как материала. Особенности же их объясняются главным образом чрезвычайно высокой пористостью и влажностью. Рыхловолокнистая структура, дисперсно-коллоидные свойства, невысокий удельный вес — все это дает возможность торфу и органическим илам удерживать в порах объем воды, в десятки раз превышающий объем скелета.

Избыточная увлажненность, малая плотность, сильная сжимаемость и наличие волокнистых и иных включений делают слабые грунты особенно чувствительными к отбору образцов из грунтовой толщи. По этим же причинам затруднена проходимость машин, что исключает возможность применения тяжелого изыскательного оборудования.

Существенную роль играет макроструктура слабых грунтов, отличающаяся всевозможным чередованием разнородных пластов и подстилающих грунтов.

Эти специфические особенности строения, структуры и состояния слабых грунтов требуют таких методов исследования и аппаратуры, которые максимально используют существующие, хорошо отработанные методы и в то же время наиболее полно учитывают специфику исследуемого объекта.

В состав лабораторных полевых исследований слабых грунтов при изысканиях переходов через болото в первую очередь включают определение основных, так называемых, индексационных показателей физического состояния грунта, по которым с помощью справочных материалов можно найти механические характеристики, необходимые для расчета дорожной конструкции.

Таблица 3. Основные показатели слабых грунтов

Категория грунтов	$W_n, \%$	$\rho, \text{г/см}^3$	$\epsilon_n$	$\gamma_{ск}, \text{г/см}^3$	$A_c, \%$	$C_{\epsilon}, \text{г/см}^2$	$E_n, \text{кг/см}^2$	$\varphi^\circ$	$K_{\phi}, \text{см/с}$
Волокнистый торфяной грунт	1400-2500	1,6-1,7	22-40	0,04-0,07	1,5-3	0,09-0,12	0,15-0,55	25-40	$10^{-8}-10^{-4}$
Торфяной грунт	900-1400	1,5-1,6	13-12	0,07-0,10	3-8	0,12-0,15	0,25-0,90	25-35	$10^{-4}-10^{-5}$
	500-900	1,4-1,5	9-13	0,11-0,14	8-30	0,15-0,18	0,50-1,30	25-35	$10^{-5}-10^{-6}$
Загорофованный грунт	200-500	1,5-2,0	3-9	0,20-0,40	40-90	0,18-0,30	1,3-5,0	20-30	$10^{-5}-10^{-7}$
Сапропели органич.	1600-3000	1,4-1,7	23-30	0,04-0,07	10-30	0,02-0,03	0,01-0,03	15-20	$10^{-8}$
Органогенные сапропели	850-1600	1,7-2,0	16-23	0,07-0,10	30-50	0,03-0,04	0,06-0,08	20-25	$10^{-4}$
Органич. сапропели	350-830	2,0-2,3	9-16	0,10-0,25	50-70	0,04-0,15	0,06-0,09	25-28	$10^{-5}$
Или глинистые	60-120	2,6-2,8	1,5-3	0,73-0,86	90-95	0,02-0,20	2-16	-	$10^{-7}-10^{-8}$
Или сульфидные	35-60	2,6-2,7	1,1-1,7	1,0-1,3	90-95	0,10-0,27	10-32	-	$10^{-6}-10^{-7}$



Значение этого этапа особенно возрастает при изысканиях лесовозных дорог, когда в целях экономии средств и времени грунты в стационарной лаборатории не исследуются.

В табл. 3 представлены характеристики слабых грунтов, в которую вошли данные Л.С.Амаряна [5], Г.В.Сорокиной [32] и А.Н.Рубинштейна [31]. Из таблицы следует, что физические характеристики торфяных грунтов и сапрпелей совпадают между собой довольно близко, хотя происхождение каждого из этих грунтов имеет иную основу. В сапрпелях отсутствует волокнистая масса и это существенно снижает их прочность по сравнению с торфяными грунтами. Подобное явление наблюдается у глинистых илов при высокой влажности и значительном коэффициенте пористости. Однако илы в целом имеют повышенную плотность, что характеризуется в основном минеральным их происхождением и высоким значением удельного веса твердой фазы.

К специфическим характеристикам болотных грунтов следует отнести описание структуры. Этот показатель не поддается количественному выражению и носит описательный характер, но значение его, особенно при решении вопроса о выборе варианта конструкции земляного полотна, очень велико. Анализ структуры торфяной залежи дает возможность учесть анизотропность ее строения хотя бы в качественном отношении.

К структурным признакам относятся: состав скелета торфа (волокнистый, аморфный); расположение частиц в плоскости простираения; характер связности элементов скелета.

Моховой торф малой степени разложения имеет четко выраженную солоmistую структуру с горизонтальным слоистым расположением волокон. При большей степени разложения увеличивается плотность размещения волокон, которые местами обволакиваются гумусной массой. Шейхпериевый торф имеет четкую горизонтальную слоистость, гумус образует прослойки между растительными волокнами. Низинный торф малой степени разложения (до 25%) сложен из раздробленных волокон войлочной (осоковый), слоисто-войлочной (тростниковый, вахтовый) или чешуйчато-слоистой (глиновый) структуры.

Частицы гумуса имеют форму отдельных сгустков, не выделяющихся четко в элементах разрушенных волокон. Древес-

445139

ный торф имеет зернистую структуру, гумус в нем размещается более равномерно, создавая при увеличении степени разложения вид общей аморфной массы. Однако следует заметить, что в низинном и органическом иле наличие многовалентных катионов приводит к коагуляции мелкодисперсной фазы, образованию новой, также достаточно прочной структуры [15].

Структурные особенности объясняют различие в сопротивлении сдвигу торфов разного состава при одинаковой пористости и влажности, а также различие в водопроницаемости в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Методика определения обычных для всех грунтов исходных физических показателей состояния регламентирована ГОСТами.

Полученные для каждой пробы физико-механические характеристики слабых грунтов заносят в специальную ведомость, которая прилагается к паспорту болота и служит одним из основных документов изысканий.

#### 4. Методика лабораторных определений физико-механических показателей слабых грунтов

Характеристики физико-механических свойств грунтов определяются на основании полевых и лабораторных испытаний или принимаются по справочным данным.

Справочные данные полезны для предварительной оценки геологических условий района строительства. Непосредственное использование их для инженерных расчетов возможно лишь на начальных стадиях проектирования или в случае строительства дорог низких категорий.

Полевые испытания производятся непосредственно на месте строительства. Они позволяют установить свойства сравнительно больших объемов грунта в условиях его природного залегания и при минимальном нарушении структуры. Недостатком полевых методов является их относительная сложность и трудоемкость.

Лабораторные исследования намного проще и дешевле полевых. Обычно при изысканиях в лаборатории удается провести значительно больше испытаний, чем в поле. Однако и у лабора-

торных методов есть недостатки. Главный из них - необходимость работать со сравнительно небольшими образцами, не всегда правильно отражающими свойства грунта в массиве.

Наиболее полно и достоверно значения характеристик физико-механических свойств грунтов могут быть определены при надлежащем сочетании полевых и лабораторных методов исследования.

**В л а ж н о с т ь .** В настоящее время из всех известных методов определения влажности торфа широко используется лишь термостатный, обеспечивающий высокую точность измерения массы влаги.

Л.С.Амарян предлагает новый метод определения влажности торфа путем механического обезвоживания в тонких слоях [1]. В результате анализа опытных данных им было установлено, что значения конечной влажности торфа после отжатия варьируют в значительных пределах.

Сравнительно малое давление, небольшая продолжительность опытов и стабильность конечных результатов утверждают новый метод, сущность которого заключается в следующем [2]. Исходная навеска торфа 3-5 г обкладывается с двух сторон марлевыми, а затем бумажными фильтрами и устанавливается между двумя жесткими металлическими пластинами, на которые передается усилие 2500-3000 кг от гидравлического пресса в течение 3-5 мин. Отжатая влага впитывается фильтрами, а сухая масса, легко отделяемая от марлевого фильтра, вновь взвешивается на весах и по разности весов устанавливается влажность торфа. При этом имеется в виду, что после отжатия в торфе остается лишь связанная вода  $W_{св}$ , содержанием которой задаются при расчете.

Исходным уравнением для определения влажности  $W_t$  является

$$W_t = \frac{Q_1}{Q_2} (100 + W_{св}) - 100\%, \quad (1)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  - соответственно, вес исходного и обезвоженного торфа.

Использование нового метода исключает необходимость термостатной сушки материала, сводя процесс лишь к двум взвешиваниям, и тем самым позволяет осуществлять весь процесс

как в лабораторных, так и в полевых условиях. Ошибки в определении влажности не превышают 5 %.

Для осуществления процесса обезвоживания используется широко распространенный автомобильный гидродомкрат с усилием 5 т с простейшими устройствами, куда входят две стойки с перекладиной и 8-10 пар жестких металлических дисков толщиной 6 мм и диаметром 70 мм. Применение не одной, а 8-10 пар дисков позволяет одновременно обезвоживать столько же образцов торфа, что значительно ускоряет весь процесс опыта.

Влажность слабых минеральных грунтов исследуется стандартными методами в соответствии с ГОСТом 5180-64.

Объемный вес определяют методом режущих колец. Стандартный метод парафинирования, который для минеральных грунтов дает более точные результаты, для торфа непригоден.

Для торфяных грунтов объемный вес почти исключительно зависит от влажности. С точностью, достаточной для ориентировочных расчетов, объемный вес торфов может быть определен [15] по табл. 4.

Таблица 4. Объемный вес торфа

Относительная влажность, %	Степень разложения, %						Для вычисления объемного веса низинного торфа добавлять
	10	20	30	40	50	60	
	Объемный вес торфа в природной залежи, Г/см <sup>3</sup>						
94	0,90	-	-	-	-	-	0,06
93	0,84	1,03	-	-	-	-	
92	0,79	0,98	-	-	-	-	
91	0,75	0,94	1,03	-	-	-	
90	0,71	0,90	0,99	-	-	-	0,05
89	0,67	0,87	0,96	1,02	-	-	
88	0,64	0,84	0,93	0,99	1,03	-	0,03
87	0,61	0,81	0,91	0,97	1,00	1,03	
86	0,58	0,78	0,88	0,94	0,98	1,01	0,01
85	0,55	0,75	0,86	0,92	0,96	0,99	

Для торфянистых и илистых грунтов с высокой зольностью значения объемного веса могут изменяться в больших пределах, и их необходимо определять в каждом случае в натуре.

Для определения удельного веса торфяных грунтов рекомендуется использовать прибор УВД-2 (рис. I) конструкции Д.С.Амаряна (Калининский политехнический институт). Торф в воздушно-сухом состоянии (влажность 10–25%) подвергается сжатию в закрытой камере под давлением 3500–4000 кг/см<sup>2</sup>. В сжатом состоянии определяется его объем с последующим пересчетом и вычислением удельного веса. Продолжительность одного испытания составляет 10–12 мин.

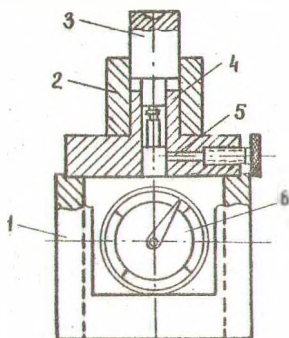


Рис. I. Прибор УВД-2 для определения удельного веса торфяного грунта

1 - подставка; 2 - матрица;  
3 - пуансон; 4 - основание;  
5 - винт; 6 - индикатор.

Навеску торфа, помещенную в матрицу, уплотняют через пуансон под гидравлическим лабораторным прессом.

Толщина опрессованного образца вычисляется по показанию индикатора.

Удельный вес торфяного грунта можно определить также обычным стандартным пикнометрическим способом.

Для определения показателя степени разложения имеется ряд методов: визуальный, глазомерный, микроскопический, отмучивания, химический, весовой и др. Каждый из этих методов имеет свои недостатки, результаты часто зависят от опытности и квалификации исполнителя.

В полевых и лабораторных условиях целесообразно применение трех наиболее удобных и простых методов: а) микроскопического, б) весового, в) глазомерно-макроскопического [26].

Микроскопический метод самый простой и быстрый. Он заключается в следующем. Пробу торфа весом 30–40 г. помещают на листке картона или пергамента, тщательно перемешивают и разравнивают тонким слоем, добавляют несколько капель воды и покрывают покровным стеклом. Затем при увеличении в 100 раз

рассматривают на каждом стекле в разных его частях до 10 полей зрения и в процентах оценивают площадь, занятую гумусом, относительно всей площади торфа. Степень разложения определяется как среднее арифметическое из всех 30 определений с округлением до 5 %.

Весовой метод основан на технических приемах и общепринятых способах измерения. Для определения степени разложения по этому методу берут пробу весом 50 Г и делят на весах на две равные части.

Одну из них высушивают в термостате при температуре 105<sup>0</sup>С, взвешивают с точностью до второго знака. Вторую часть образца торфа отмучивают струей воды на сите с отверстиями 0,1-0,25 мм для отделения гумусовой массы. Отмучивание продолжают до тех пор, пока из сита не будет вытекать прозрачная вода. Оставшиеся в сите промытые растительные остатки высушивают в термостате до абсолютно сухого состояния при температуре 105<sup>0</sup> и взвешивают.

Степень разложения подсчитывается по формуле

$$R = 100 - \frac{a \cdot 100}{b}, \quad (2)$$

- где R - степень разложения;  
a - вес абсолютно сухого волокна из отмученной навески;  
b - вес абсолютно сухого торфа неотмученной половины.

Глазомерно-макроскопический метод основан на определении на глаз структуры торфа, его консистенции при сжатии в руке, цвета воды, выделяемой торфом при сжатии, и его упругих свойств.

В настоящее время комплекс признаков визуального определения степени разложения дополнен еще одним показателем - мазком торфа.

Этот метод предложен центральной торфяной опытной станцией. Из нескольких мест торфяного образца, вынутого из залежи, отбирается средняя проба объемом 0,5-1 см<sup>3</sup>. Пробу помещают на листе плотной белой бумаги или на странице полевого дневника, где в соответствующей строке указана глубина взятия. Нажимая пальцем на пробу, делают горизонтальный мазок на

5-10 мм. Следующие мазки из нижележащих горизонтов того же разреза располагают непосредственно один под другим. Получается цветная шкала степени разложения по всему профилю.

Мазки сравнительно быстро подсыхают и могут храниться без существенных изменений в течение длительного времени как документация строения торфяной залежи.

Для оценки степени разложения торфе мазки сравнивают со стандартной шкалой, приведенной в табл.5.

В проектной документации необходимо указывать, каким способом определена степень разложения, поскольку различные методы могут давать различные результаты.

Зольность торфа - это весовое количество золы, оставшееся от сжигания торфа, отнесенное к весу сухой навески и выраженное в процентах.

Различают два вида зольности:

а) зольность конституционную (собственную), которая получается в результате сгорания органического вещества; она обычно составляет 2-18%,

б) зольность наносную, образующуюся в результате приноса в торф минеральных частиц водой извне. Такая зольность может достигать значительных величин.

Наносная зольность может быть определена путем отмучивания от волокна декантацией.

Обычно определяют суммарную зольность в соответствии с ГОСТом 278-54.

Сущность метода заключается в сжигании навески торфа в муфельной печи и прокаливании остатка при температуре  $800 \pm 25^{\circ}\text{C}$  до постоянного веса.

Навески влажного торфа по 6-8 г закладывают в предварительно взвешенные тигли. Тигли ставят на под холодного или нагретого до температуры не выше  $300^{\circ}\text{C}$  муфеля, помещая их в предварительно определенную термопарой при полном накале муфеля зону устойчивой температуры ( $800 \pm 25$ ), закрывают дверцу и постепенно нагревают муфель до  $800 \pm 25^{\circ}\text{C}$ .

При этой температуре прокаливают в течение 2 ч в закрытом муфеле образовавшийся зольный остаток. Потом тигли с зольным остатком вынимают из муфеля, охлаждают сначала на

Таблица 5. Визуальные показатели для определения степени разложения в полевых условиях

Степень разложения	Растительные остатки	Пластично-упругие свойства	Отжимаемая вода	Запах
До 10	Хорошо сохранились и составляют почти всю массу торфа, различные мхи и остатки осевой растительности	Торф не мажет руку, отжатая масса пружинит и быстро принимает первоначальный объем	Отжимается легко, бесцветная или слабо окрашенная	Бесцветный или слабо желтый с большим количеством налипшего волокна
10-20	Хорошо сохранились, но измельчены в большей степени	При сжатии в кулаке не продавливается между пальцами, в сжатом торфе заметная упругость	Отжимается легко, мутная, желтая, коричневая или светло-серая	Желтый или слегка коричневый, светло-серый, имеет налипшие волокна
20-35	Сохранились, но определить затруднительно, часть из них гумифицирована	Несколько пластичен, при сжатии в кулаке часть торфа продавливается между пальцами, при растяжении мажет руку	Отжимается с некоторым усилием, мутная, коричневая или бурая	Коричневый или серовато-коричневый, налипшего волокна нет
35-50	Заметны, но распознаются с трудом, много гумифицированных частей	Пачкает руку, продавливается значительная часть торфа	Отжимается со значительным усилием, мутная сурая или коричневая	От коричневого до темно-коричневого с серым и черным оттенком и с глянцовой поверхностью
Более 50	Мало заметны, или почти незаметны, преобладает гумифицированная масса	Большая часть полностью продавливается между пальцами, пачкает руку	Почти или совсем не отжимается	Темно- или черно-коричневый, хорошо сохраняет отпечатки пальцев



воздухе (на асбестовом листе) в течение 5 мин, а затем в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивают с точностью до 0,001 на аналитических весах.

Затем производят контрольное прокаливание тиглей с зольным остатком в течение 40 мин при температуре  $800 \pm 25^{\circ}$  и после охлаждения и взвешивания определяют изменение веса.

Если изменение веса (в сторону уменьшения или увеличения) будет меньше 0,005 Г, то испытание заканчивают и для расчета принимают последний вес.

При изменении веса на 0,005 Г и более производят дополнительные контрольные прокаливания, каждое в течение 40 мин, до тех пор, пока разность в весе при двух последовательных взвешиваниях будет менее 0,005 Г.

Зольность торфа  $Z$ , %, вычисляется по формуле

$$Z = \frac{(a-b)}{b} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $a$  - вес тигля с золой, Г;

$b$  - вес пустого прокаленного тигля, Г;

$b$  - навеска абсолютно сухого торфа.

В случае использования навески влажного грунта одновременно с сжиганием торфа определяется влажность и затем производится перерасчет веса влажной навески к абсолютно сухой.

Аналогично определяют потери  $Q$  после прокаливании для органико-минеральных грунтов, при этом

$$Q = 100 - A, \quad (4)$$

где  $A$  - отношение веса абсолютно сухой навески после и до прокаливании, %.

С ж и м а е м о с т ь т о р ф а, как и минеральных грунтов, характеризуется компрессионными кривыми, т.е. кривыми связи коэффициента пористости торфа с приложенной нагрузкой в условиях невозможности бокового расширения.

Компрессионные кривые (рис.2) имеют две ветви: ветвь (а) сжатия (нагрузки) и ветвь (б) расширения (разгрузки). Увеличение коэффициента пористости торфа при разгрузке связано упругим свойствам торфяного скелета, а также всасыванию образцом воды.

В связи с этим каждому значению давления на торф соответствуют два значения коэффициента пористости, а для грунтовой массы — два значения влажности (при нагрузке и при разгрузке). Несовпадение кривой расширения с кривой уплотнения свидетельствует о наличии остаточных деформаций в скелете торфа.

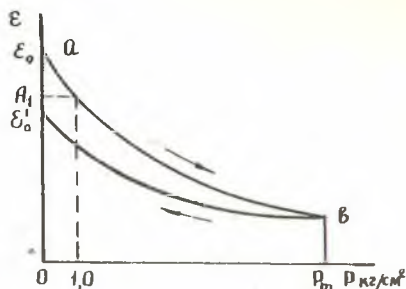


Рис. 2 Компрессионная кривая

Исследования геотехнической лаборатории строительства канала им. Москвы [19] показали, что уравнение компрессионной кривой для минеральных грунтов в большинстве случаев является пригодным и для торфов. Это положение было подтверждено рядом других исследователей [23, 28].

Уравнение компрессионной кривой для торфа имеет следующий вид:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \alpha \ln \frac{P + P_k}{P_k}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент пористости торфа, соответствующий давлению  $P$ ;

$\varepsilon_0$  — начальный коэффициент пористости;

$P_k$  — начальное внутреннее давление в торфе;

$\alpha$  — показатель уплотнения компрессионной кривой.

Показатель уплотнения компрессионной кривой является весьма важной характеристикой, указывающей на степень сжимаемости грунта под нагрузкой. Колебания величины  $\alpha$  для одного и того же минерального грунта обычно находятся в пределах 5–10% [24]. Показатель уплотнения торфа зависит от его степени разложения, зольности, переработки, ботанического состава и изменяется в широких пределах.

Начальное внутреннее давление в торфяной залежи невелико и по опытам К.П.Лундина [24] составляет от 0,001 до 0,125 кг/см<sup>2</sup>. Однако для сильно уплотненных торфов [19] оно может изменяться от 0,5 кг/см<sup>2</sup>, а в отдельных случаях даже до 0,9 кг/см<sup>2</sup>.

Так как в большинстве случаев величина начального внутреннего давления в торфе невелика, то в практических расчетах часто пользуются приближенным уравнением компрессионной кривой

$$\epsilon = A - a \ln p, \quad (6)$$

где  $A$  - коэффициент пористости торфа при нормальной нагрузке, равной  $1 \text{ кг/см}^2$ .

Некоторые ориентировочные значения параметров компрессионной кривой для торфов разной степени разложения [33] приведены в табл. 6.

Таблица 6. Параметры компрессионной кривой

Грунт	$a$	$A$
Торф $R = 0-10\%$	3,0-4,0	8,5-1,0
10-25%	2,5-3,0	8,0-9,0
40% и более	1,5-2,5	6,0-8,0
Сапрпель, торфяной ил	0,75 - 1,5	4,0-6,0
	0,25 - 1,5	2,5-4,0

А.Ф.Печкуровым на основании опытов предложено уравнение компрессионной кривой в следующем виде:

$$\epsilon = \epsilon_0 - \frac{\epsilon_0 - 1}{2,35} \ln \frac{p}{25}, \quad (7)$$

где  $p$  - давление,  $\text{Г/см}^2$ .

Преимуществом данного уравнения является возможность построения компрессионных кривых при наличии только начального коэффициента пористости.

В лабораторных условиях сжимаемость слабых грунтов определяют компрессионными испытаниями на приборах одноосного сжатия. Испытания могут производиться на стандартных приборах, используемых для обычных грунтов, с рабочим кольцом диаметром 7,14 см и высотой 2 см. Для торфов может быть рекомендован [26] компрессионный прибор с максимальной площадью образца  $60 \text{ см}^2$ , высотой 3 см, с двумя мессурами на штампе, не требующими перестройки нуля.

Сжимаемость образцов слабых грунтов определяют при ненарушенной структуре с принятием мер, исключающих подсуши-

вание образца грунта в процессе опыта.

Для этого в местах контакта деталей прибора, где может испаряться влага, прокладывают влажную вату или марлю. При испытании образцов грунта в водном окружении спустя 2 мин после приложения первой ступени нагрузки через бюретку заполняют прибор водой до появления ее в отверстиях штампа. Чтобы удалить воздух из прибора в процессе подачи воды к образцу, второй штуцер должен быть открыт, пока в нем не появятся капли воды. Уровень воды в бюретке устанавливают по верхней грани рабочего кольца и поддерживают на протяжении всего времени испытаний образца.

После подготовки образца к испытаниям определяют его сжимаемость.

Для образцов глинистых грунтов текучей консистенции ( $V > I$ ) и сапрпелей рекомендуются следующие ступени нагрузки: 0,02; 0,03; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 1,9 кг/см<sup>2</sup> и т.д. до заданной максимальной нагрузки. В зависимости от состояния грунта количество ступеней может быть сокращено. Для пластичных глинистых грунтов и торфов рекомендуются ступени нагрузки: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0; 2,0 кг/см<sup>2</sup> и т.д.

Отсчеты показаний индикатора после приложения каждой ступени нагрузки производят через 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30 мин, 1 ч, 2 ч. и далее 2 раза в сутки. Каждую ступень нагрузки выдерживают до стабилизации осадки образца. Осадка считается стабилизировавшейся, если показания индикатора изменяются не более чем на 0,001 мм за 24 ч для илов, 12 ч для глин, торфов и суглинков и более 6 ч для супесей.

Результаты испытаний заносят в журнал (табл. 7)

Таблица 7. Журнал испытаний при определении компрессии и консолидации

Грунт.....	Место взятия .....
Высота кольца =	Вес кольца =
Диаметр кольца =	Вес кольца с влаж. грунтом =
Объем кольца =	Вес сухого грунта =
Площадь сечения =	Удельный вес грунта =

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нагрузки, кг/см <sup>2</sup>	Дата	Время от момента при- ложения данной ступе- ни нагрузки, t	Отсчет по мессуре	Деформация грунта прибора $\Delta l$	Деформация прибора (по тарировочной кри- вой) $\Delta l'$	Абсолютная деформа- ция грунта $\Delta h = \Delta l' - \Delta l$	Относительная де- формация грунта $\sigma = \frac{\Delta h}{h}$	Приведенная дефор- мация (изменение пористости) $\Delta \varepsilon = \frac{\Delta h}{h} (1 + \varepsilon)$

Перед началом испытаний необходимо сделать тарировку прибора при помощи жесткой нержавеющей болванки, имеющей форму образца и помещаемой вместо него в прибор. Тарировка должна производиться в тех же условиях, что и испытание. С обеих сторон болванки прокладывается по листу влажной фильтровальной бумаги. Однако поскольку деформация прибора происходит быстро, время, необходимое для окончания деформации при каждой ступени нагрузки, невелико и не превышает 1 мин. Результаты тарировки заносят в тарировочный журнал (табл.8).

Таблица 8. Журнал тарировки компрессионных приборов

Нагрузки, кг/см <sup>2</sup>	Деформация прибора, мм			Средняя поправ- ка на деформа- цию прибора, мм
	$l_1$	$l_2$	$l_3$	

Тарировка повторяется три раза, и в расчет берется среднее значение деформации прибора. Размеры кольца, т.е. его высота и внутренний диаметр, а также вес определяются заранее.

Обработка результатов испытаний проводится в обычном порядке. По результатам определения размеров кольца  $h$  и  $d$  определяется его объем  $V$ , а по результатам взвешивания пустого кольца, кольца с влажным грунтом до опыта и сухого грунта определяются следующие характеристики:

а) объемный вес влажного грунта

$$\gamma = \frac{Q_1 - Q}{V}, \quad (8)$$

где  $Q_1$  - вес кольца с грунтом в начале опыта;  
 $Q$  - вес пустого кольца и  $V$  - его объем;

б) объемный вес скелета

$$\gamma_c = \frac{q_2}{V}, \quad (9)$$

где  $q_2$  - вес сухого грунта;

в) начальный коэффициент пористости

$$\epsilon_0 = \frac{\Delta - \gamma_c}{\gamma_c}, \quad (10)$$

где  $\Delta$  - удельный вес грунта;

г) влажность в начале опыта

$$\epsilon = \frac{q_1 - q_2 - q}{q_2}; \quad (11)$$

д) коэффициент насыщения

$$G = \frac{\omega \Delta}{\epsilon \Delta_b}. \quad (12)$$

Далее, учитывая данные табл.7, определяются:

а) коэффициент пористости  $\epsilon$ , соответствующий законченной по времени деформации от данной ступени нагрузки  $\sigma$ , по формуле

$$\epsilon = \epsilon_0 - \Delta \epsilon = \epsilon_0 - \frac{\Delta h}{h} (1 + \epsilon_0) \quad (13)$$

и для каждого интервала нагрузки;

б) коэффициент уплотнения

$$a = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \sigma} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_1}. \quad (14)$$

После определения коэффициента пористости для каждой ступени нагрузки и начального коэффициента пористости  $\epsilon_0$ , определяется масштабный коэффициент

$$m_s = \frac{\Delta h}{\epsilon_0 - \epsilon} = \frac{h}{1 + \epsilon_0}. \quad (15)$$

Масштабный коэффициент дает возможность простым путем проверить правильность оформления любых компрессионных испытаний и характеризует каждый испытанный образец грунта высотой  $h$  (мм) одним постоянным числом, независимо от характера и величины прилагаемых к этому грунту нагрузок (табл.9).

Таблица 9. Результаты проверки компрессионных испытаний

1	2	3	4	5	6	7	8
N n/n	Предел нагрузок, $\sigma$ кГ/см <sup>2</sup>	Начальная высота образца, h мм	Вертикальная деформация образца (осадки) $\Delta h$ , мм	Коэффициент попористости		Масштабный коэффициент $m = \frac{\Delta h}{\epsilon_0 - \epsilon}$ или $m = \frac{h}{1 + \epsilon_0}$	Модуль осадки по Маслову $\epsilon_{pz} = 1000 \frac{\Delta h}{h} = 1000 \frac{\epsilon_0 - \epsilon}{1 + \epsilon_0}$ мм/м
				$\epsilon_0$	$\epsilon$		

В табл. 9 приводится также показатель модуля компрессии, или модуля осадки  $\epsilon_{pz}$ , выражаемого относительной деформацией испытуемого грунта по оси в промилях (мм/м) под действием нагрузки

$$\epsilon_{pz} = 1000 \frac{\Delta h}{h} = 1000 \frac{\epsilon_0 - \epsilon}{1 + \epsilon_0} \quad (16)$$

Этот показатель Н.Н.Маслова, указывающий в миллиметрах величину деформации сжатия столба грунта высотой в 1 м под действием приложенных к грунту нагрузок  $P$  (кГ/см<sup>2</sup>) на глубине  $Z$  (м), позволяет проводить расчет осадок  $\Delta h$  по формуле

$$\Delta h = \epsilon_{pz} \cdot h \quad (17)$$

При определении консолидации образца грунта во времени каждый из образцов вначале подвергается предварительному обжатию под нагрузкой, равной средней природной нагрузке для рассматриваемого слоя. Последнюю можно определить по перегибу начального участка компрессионной кривой, построенной по результатам испытаний с малыми ступенями нагрузки. Допускается вычислять природную нагрузку по формуле

$$\sigma_{np} = \gamma_{cp} \cdot Z, \quad (18)$$

где  $\gamma_{cp}$  - средний объемный вес грунта, расположенного выше середины рассматриваемого слоя с учетом в необходимых случаях эффекта взвешивания;

$Z$  - расстояние по вертикали от поверхности грунта до середины рассматриваемого слоя.

После предварительного обжатия под природной нагрузкой каждый образец взвешивают, затем вновь помещают под природную нагрузку, после чего испытывают под одной ступенью дополнительной нагрузки. Величину ступени назначают с учетом возможной величины реальной нагрузки (в том числе и с учетом возможной временной пригрузки). При расчете невысоких насыпей (до 5–6 м) обычно принимают следующие ступени (величины нагрузки сверх природной) 0,1; 0,2; 0,5; 0,75; 1,0; 2,0 кг/см<sup>2</sup>.

Процесс деформации каждого образца под действием приложенной к нему ступени нагрузки фиксируется по показанию мессур. Затем строят два графика относительной осадки во времени: один – зависимость относительной осадки от логарифма времени, другой – зависимость осадки от квадратного корня из времени (время в минутах). По графикам устанавливают величину мгновенной фильтрационной и вторичной (для торфа) осадки.

Опыт продолжают до завершения первичной осадки. Затем получают несколько точек, соответствующих участку вторичной консолидации, через которые проводят прямую линию (в полулогарифмическом масштабе). Указанную прямую экстраполируют до тех пор, пока интенсивность деформации не будет менее 0,01 мм/сутки. Осадку, соответствующую моменту достижения этой интенсивности, принимают за конечную.

В о д о п р о н и ц а е м о с т ь характеризуется показателем, называемым коэффициентом фильтрации  $K_f$ , который представляет собой скорость фильтрации при напорном градиенте  $J$ , равном единице,  $V_f = K_f J$ . Выражают коэффициент фильтрации в см/с или в м/сутки. Коэффициент фильтрации используют при расчетах осадки во времени, песчаных дренах, дренажных устройствах и т.д.

Существует несколько методов определения коэффициента фильтрации грунтов [26]:

- а) непосредственное лабораторное в фильтрационных приборах;
- б) косвенное, путем вычисления по данным компрессионных испытаний;
- в) полевое опытное с помощью откачки.

Полевые определения коэффициентов фильтрации произво-



дилься целым рядом исследователей в самых различных условиях, как на неосушаемых, так и на осушенных болотных массивах, на различных типах болотных массивов и в разных географических районах.

Наиболее обстоятельные исследования принадлежат А.Д.Дубаху [14], производившему их в районах Полесья и северо-западных областях СССР, К.Я.Кожанову [21] (для районов БССР), К.Е. Иванову [16].

В работе А.Ф.Печкурова [27] приводятся данные по определению фильтрации для низинных болот БССР, на основании которых составлена сводка, приведенная в табл. 10. Из таблицы видно, что в осоковых, осоково-гириновых и осоково-сфагновых

Таблица 10. Коэффициенты фильтрации торфа в низинных болотных массивах

Тип болотного микрорландшафта	Вид торфа	Степень разложения %	Средние коэфф. фильтрации в см/с при глубине горизонтов от поверхности, см			Среднее знач. коэфф. фильтрации, см/с
			до 50	50-100	100-150	
Осоково-гириновый	Осоково-древесный и тростниково-осоковый	Верхний горизонт 35-40, нижний горизонт 55-60	0,0007	0,00015	-	0,00045
То же	Осоковый	Не определена	0,0012	0,00070	0,00053	0,00081
То же	Осоковый и гириново-осоковый	45-55	0,0011 0,0019	0,00080 0,00038	- 0,00043	0,0010 0,00090
То же	То же	45-55	-	-	-	0,00030 0,00079
То же	То же	45-55	0,0031	0,00040	0,00006	0,0012
Осоковый	Осоковый	50	0,0083	0,00055	0,00029	0,00056
То же	То же	70-75	0,0016	0,00026	-	0,00093
Осоково-сфагновый	Осоково-сфагновый с единичными древесными остатками	30-40	0,0015	0,00041	-	0,00095
Среднее значение			0,0015	0,00045	0,00033	0,0008

микрорландшафтах и соответствующих им видах торфа средний коэффициент фильтрации в толще залежи от 0 до 1,5 м представляет собой довольно устойчивую величину, равную 0,001 см/с, при амплитуде изменения от 0,008 до 0,0002.

В работе К.Я.Кожанова для неосушенных низинных болот Полесской низменности дается изменение коэффициента фильтрации в пределах от 0,0025 до 0,01 см/с. А.Д.Брудастов предлагает [8] принимать для осокового малоразложившегося торфа значения  $K = 0,002-0,006$  см/с, а для среднеразложившегося -  $K = 0,0002-0,0008$  см/с.

Сравнивая эти значения с данными табл. 10, убеждаемся, что максимальное значение  $K = 0,0008$  см/с, по А.Д.Брудастову, для среднеразложившегося осокового торфа точно совпадает со средним значением  $K$  для различных видов низинного торфа, по А.Ф.Печкурову, степень разложения которых колеблется около средней.

Совпадение результатов, полученных различными исследователями для разных географических пунктов, свидетельствует о том, что водные свойства торфа одного и того же типа являются вполне устойчивыми характеристиками для различных физико-географических районов. Поэтому могут быть установлены расчетные их значения.

Для низинных неосушенных болотных массивов могут быть приняты следующие расчетные значения коэффициентов фильтрации: слабо-разложившийся низинный торф  $K_{ср.} = 0,005$  см/с, пределы изменения  $K$  - от 0,0002 до 0,003 см/с; среднеразложившийся низинный торф  $K_{ср.} = 0,0008$  см/с, пределы изменения  $K$  - от 0,0002 до 0,003 см/с.

Для расчетов устойчивости и общей прочности оснований необходимо данные о сопротивлении грунтов сдвигу.

Методика проведения испытаний на сдвиг болотных слабых грунтов по существу не отличается от испытаний минеральных связанных грунтов.

Опыты, проведенные различными исследователями, показывают, что силы сопротивления грунта сдвигу по некоторой поверхности тем больше, чем больше сжимающие напряжения нормальные к этой поверхности.

Экспериментально установлено, что в момент перехода от равновесия к разрушению, т.е. в предельном состоянии, существует нижеследующая зависимость между сопротивлением грунта сдвигу  $\tau$  и напряжением, нормальным к поверхности сдвига  $\sigma_n$ .

$$\tau = K\sigma_n + C = \operatorname{tg}\varphi\sigma_n + C. \quad (19)$$

Зависимость (19) была дана еще в ХУШ в. Кулоном и выражает условие прочности грунтов. Графически уравнению Кулона соответствует прямая линия, отсекающая на оси ординат отрезок, равный  $C$ , и наклоненная к оси абсцисс под углом  $\varphi$ , тангенс которого равен  $K$ .

Экспериментальные определения характеристик прочности грунтов производятся различными способами:

1) поступательным или вращательным смещением части образца грунта вместе с включающей его обоймой относительно остальной части образца;

2) раздавливанием образца грунта в условиях трехосного сжатия;

3) раздавливанием образца грунта в условиях одноосного сжатия;

4) вдавливанием в грунт штампов;

5) проворачиванием в грунте вдавленной крыльчатки с тонкими лопастями.

Наибольшее распространение среди лабораторных методов получили – разрушение при трехосном сжатии и срез по фиксированной плоскости.

Испытание методом сдвига по принудительной поверхности чаще всего производится на одноплоскостном сдвижном приборе. Схема прибора представлена на рис. 3.

Образец грунта в форме невысокого цилиндра (обычные размеры: диаметр – 7 см; высота – 2 см) помещается между двумя кольцевыми обоймами – подвижной и неподвижной. На грунт передается нормальное давление через поршень. Подвижная обойма может перемещаться в горизонтальной плоскости под действием постепенно возрастающего сдвигающего усилия. В процессе испытания происходит разрушение (сдвиг) грунта по поверхности а-а.

Для определения зависимости  $\tau_0$  от  $\sigma_n$  необходимо взять несколько проб одного и того же грунта при различных нормальных давлениях. В ходе испытаний устанавливаются соответствующие значения сопротивления сдвигу, после чего по точкам можно построить график зависимости  $\tau = f(\sigma_n)$  (рис. 3б).

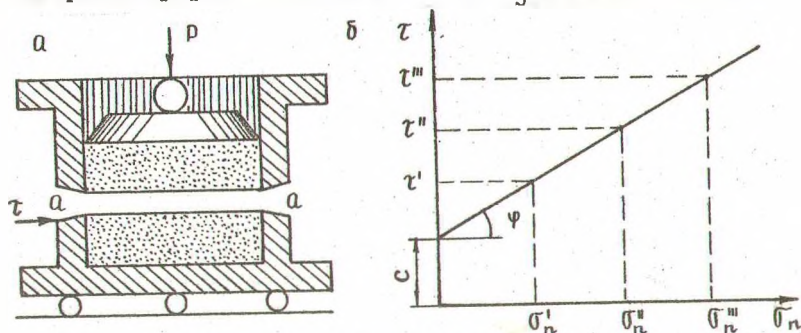


Рис. 3 Испытание методом сдвига

а - схема одноплоскостного сдвижного прибора;

б - зависимость сопротивления сдвигу от вертикальной нагрузки

При испытании в сдвижном приборе грунт находится в таких же условиях, как в одометре, т.е. имеется лишь некоторый частный случай трехосного сжатия, и произвольно регулировать соотношение главных напряжений в зависимости от задач эксперимента нельзя. Кроме того, наличие жестких обжим и щели между ними вызывает искажение результатов вследствие воздействия сил трения по боковой поверхности образца, заклинивания зерен и т.д.

Все это заставляет считать метод плоскостного сдвига менее совершенным, чем способ трехосного сжатия. Однако простота устройства и широкое распространение таких приборов, а также наличие хорошо разработанных методов испытаний привели к тому, что этот метод имеет распространение.

Для испытания на трехосное сжатие применяются стабилометры. Образец грунта в резиновой оболочке имеет диаметр 4-6 см. Боковое давление осуществляется водой, нагнетаемой в камеру при помощи плавающего поршня. Вертикальное давление создается рычажным прессом.

Для определения расчетных значений характеристик сопротивления сдвигу несколько образцов исследуемого грунта разрушаются при различных боковых давлениях  $\sigma_2$  и опытным путем устанавливаются соответствующие значения осевых давлений. По результатам испытаний строятся круги напряжений, к которым проводится общая касательная.

Можно также непосредственно замерить угол наклона поверхности разрушения к вертикали, который равен  $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ .

Испытания на стабилометрах представляют ряд преимуществ по сравнению с методом одноплоскостного сдвига. Важное значение имеет возможность создания любого соотношения главных напряжений, действующих на образец, и произвольное изменение их по желанию экспериментатора в процессе опыта.

Выбор метода прочности слабых грунтов должен быть осуществлен с позиции их сжимаемости или водопроницаемости.

Можно указать два наиболее характерных режима испытаний, положенных в основу современной методики лабораторного определения расчетных характеристик прочности.

Открытый сдвиг. При воздействии на грунт как нормальных, так и касательных напряжений процесс уплотнения доводится до полного завершения (полная консолидация). Иначе говоря, разрушение наступает лишь после максимального уплотнения грунта.

Закрытый сдвиг. Грунт доводится до разрушения без изменения его начальной плотности и влажности.

Для открытого сдвига образец грунта сначала обжимается заданным вертикальным давлением, пока деформации практически затухнут. Затем на грунт передаются сдвигающие напряжения, возрастающие достаточно медленно, с таким расчетом, чтобы оказалось завершаемым вызываемое ими дополнительное уплотнение, и лишь после этого происходит сдвиг образца. В случае закрытого сдвига, наоборот, принимают все меры для предотвращения уплотнения грунта: вертикальную и сдвигающую нагрузки повышают в возможно быстром темпе, исключают отжатие воды, изолируют фильтрующие поверхности дна и поршня и т.д. Результаты испытаний одного и того же глинистого грунта на закрытый или открытый сдвиг схематически представлены

графиком, изображенным на рис. 4

Различие в результате испытаний объясняется указанными выше особенностями методик.

В случае открытого сдвига разрушение образцов происходит после их уплотнения, т.е. при пористости и влажности меньших, чем исходные. Этим вызвано сравнительно быстрое нарастание сопротивления сдвигу при повышении нормального давления, что отражается на величине параметра.

При испытании на закрытый сдвиг теоретически все давления воспринимаются водой. Сопротивление сдвигу оказывает ненагруженный скелет грунта за счет не зависящих от эффективного давления сил связности. В этих условиях сопротивление сдвигу не будет зависеть от нормального давления, т.е. параметр  $\varphi$  окажется равным нулю.

Из сказанного выше становится очевидным, что для определения расчетных характеристик сопротивления сдвигу слабых грунтов необходимо применять такую методику, которая обеспечивает наибольшее соответствие режима испытаний тем условиям, которые будут иметь место в дальнейшем, при строительстве и эксплуатации сооружения, т.е. с учетом скорости возрастания давления и уплотнения грунта.

Внутреннее трение. Внутреннее трение, или сопротивление взаимному перемещению частиц скелета торфа, возникает при деформации сдвига вследствие зацепления отдельных частиц друг за друга.

Силы внутреннего трения в грунтах пропорциональны нормальному давлению и характеризуются углом внутреннего трения  $\varphi$ . Величина угла внутреннего трения торфа зависит от формы и крупности частиц, влажности, степени уплотнения и т.д.

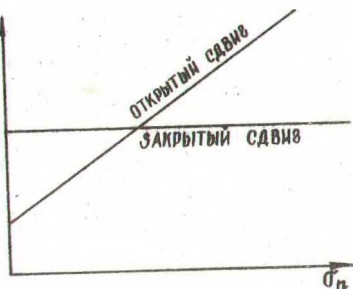


Рис. 4 График сопротивления сдвигу глинистого грунта по открытой и закрытой схемам

Таблица II. Сопротивление сдвигу различных видов торфа

Вид торфа	Степень разложения, %	Зольность, %	Структура	Угол внутреннего трения	Сцепление кГ/см <sup>2</sup>
Гипново-тростниковый	47	13,1	естест.	19°00'	0,510
То же	77	11,0	естест.	9°55'	0,432
Древесный	77	14,0	естест.	17°40'	0,585
"    "	55	2,3	естест.	20°00'	0,270
Древесно-осоковый	60	22,0	естест.	14°45'	0,320
"    "	90	12,5	наруш.	20°30'	0,300
Пушицевый	40	3,3	наруш.	25°40'	-
Осоковый	80	11,0	наруш.	23°00'	0,280
"    "	80	11,0	естест.	28°00'	0,251
Осоково-древесный	85	11,1	естест.	24°50'	0,290
"    "	85	11,1	наруш.	17°30'	0,262
Сфагново-пушицевый	90	2,5	естест.	21°50'	0,100
Тростниковый	40	9,2	естест.	20°40'	0,503
"    "	40	9,2	наруш.	15°00'	0,243
Травяно-древесный	70	17,1	естест.	13°55'	0,782

В табл. II приведены некоторые данные по сопротивлению сдвигу различных торфов в зависимости от степени гумификации, зольности и структуры. Как видно из таблицы, нарушение структуры приводит к уменьшению сил сцепления и меньше отражается на изменении угла внутреннего трения.

## 5. Полевые методы определения характеристик механических свойств грунтов

В последнее время широкое распространение приобрело исследование грунтов путем вращательного среза в скважинах с помощью лопастных приборов-крыльчаток (для получения параметров сопротивления сдвигу); испытание грунтов штампами (для определения модуля деформации), зондирование грунтов (для определения прочности грунтов); находит применение метод прессиометра (для нахождения модуля деформации грунта в скважинах) и т.д.

Метод вращательного среза, испытание грунтов штампами и зондирование получили повсеместное распространение при исследовании илистых грунтов текучей и пластичной консистенции. В настоящее время их широко используют при исследовании торфов.

Выбор метода испытания слабых грунтов на прочность ( $\varphi = 0$  и  $\varphi \neq 0$ ) характеризуется следующими положениями [3]:

1. Слабые грунты, обладающие низкой водопроницаемостью, могут быть испытаны полевыми приборами на прочность по методу  $\varphi = 0$ .

2. Слабые, полностью водонасыщенные грунты, обладающие достаточной сжимаемостью и упрочняющиеся в процессе нагружения, могут быть испытаны на прочность двояко:

а) при скорости нагружения, превышающей скорость рассасывания порового давления, необходимо испытание производить по методу  $\varphi = 0$  или оценить прочность грунта по величине сцепления;

б) при темпах строительства, допускающих консолидацию основания и существенное снижение порового давления, испытание прочности грунта должно производиться с учетом действующих напряжений  $\sigma$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ .

Значительный интерес для практики представляет вопрос об оценке прочности грунта с позиции "влажность-плотность", разработанной Н.Н.Масловым. В данном случае определение угла внутреннего трения  $\varphi$  при известном напряженном состоянии сводится к оценке влажности грунта, которая хорошо коррелируется с показателем сцепления  $C$ .



Имея при этом статические закономерности изменения  $\tau$  в зависимости от  $W$  и  $\epsilon$  данного типа грунта, можно в большинстве случаев ограничиться лишь знанием величин  $W$  и  $\epsilon$ .

Находит успешное применение разработанный В.Ф.Разореновым [30] метод определения  $\psi$  и  $C$  в полевых условиях посредством совмещенных испытаний грунта на вращательный срез и пенетрацию.

Таким образом, применение полевых приборов, обеспечивающих получение большого количества экспериментальных данных, позволяет получать надежные данные для оценки прочностных свойств слабых грунтов.

Испытание грунтов на сдвиг лопастными приборами состоит в измерении максимального крутящего момента, возникающего при срезе грунта во время вращения в нем крестообразной лопасти, помещенной в грунт.

Для массовых испытаний при зондировании торфяных залежей пластов и илов рекомендуется [26] использовать разработанный в Калининском политехническом институте портативный прибор - сдвигомер-крыльчатку СК-8 конструкции проф. Л.С.Амарьяна (рис.5). Этот прибор позволяет проводить испытания без бурения скважин. Глубина зондирования практически не ограничена. Точность измерения прочности ( $\text{кг/см}^2 - 0,02$ ). Вес прибора с одной штангой - 3,7 кг, вес одной штанги - 1 кг, высота крыльчатки - 100 мм, длина штанг - 1 м. Крутящий момент от сопротивления вращению крыльчатки  $M_{кр}$  измеряется по величине деформации пластины фиксируемой индикатором часового типа.

Сопротивление грунта сдвигу устанавливается по формуле

$$\tau = \frac{M_{кр}}{K}, \quad (20)$$

где  $K$  - постоянная прибора, полученная по тарировочному графику;

$$K_1 = \frac{\pi D^2}{2} \left( \frac{D}{6} + h \right) \quad \text{- при повороте крыльчатки на поверхности или дне скважины}$$

$$K_2 = \frac{\pi D^2}{2} \left( \frac{D}{3} + h \right) \quad \text{- при срезе в толще грунта обеими торцовыми поверхностями крыльчатки;}$$

$h$  и  $D$  - высота и диаметр крыльчатки.

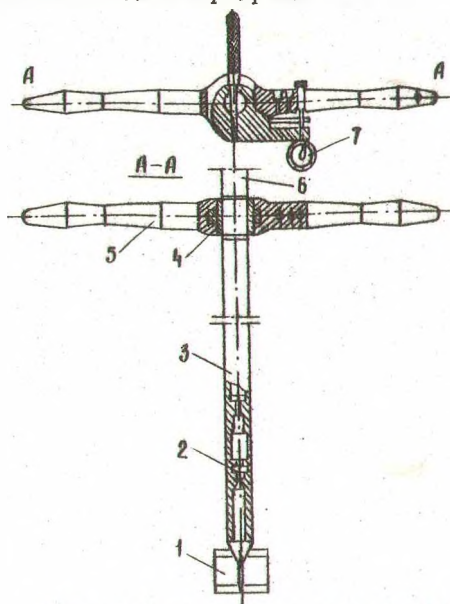


Рис. 5 Сдвигомер-крыльчатка СК-8:

1 - крыльчатка; 2 - устройство для учета трения штанг о грунт; 3, 4, 6 - штанги, соединенные резьбовыми переходниками; 5 - измерительная головка с рукояткой; 7 - индикатор часового типа.

При помощи сдвигомера осуществляется зондирование торфяной залежи вручную на полную ее глубину. Зондирование грунта с целью определения  $\tau$  при помощи крыльчатки СК-8 следует проводить через 20-30 см.

Кривые изменения сопротивления сдвигу  $\tau$  позволяют выявить неоднородность в строении залежи и заметить наиболее опасные слабые слои.

Исследование грунтов статическим зондированием позволяет установить характер напластования, консистенцию глинистых грунтов и плотность песчаных, а также оценить сопротивляемость сдвигу.

Принципиальная основа этого метода заключается в выяв-

лении корреляционной зависимости между удельным сопротивлением вдавлыванию зонда и характеристиками физико-механических свойств грунта. Величина удельного сопротивления дает возможность непосредственно оценить относительную плотность залежи на различных горизонтах. Для этого замеренные величины удельного сопротивления вдавлыванию  $\omega = \frac{P}{F}$  (где  $P$  - усилие вдавлывания, кг;  $F$  - площадь поперечного сечения наконечника, см<sup>2</sup>) откладывают по горизонтали на соответствующих отметках вертикального сечения. По полученной эпюре можно судить о плотности залежи.

Для зондирования пластов болотных грунтов может применяться пенетромтр П-4 конструкции Л.С.Амаряна (рис.6). Штанги прибора П-4 унифицированы со штанги сдвигомера-крыльчатки СК-8.

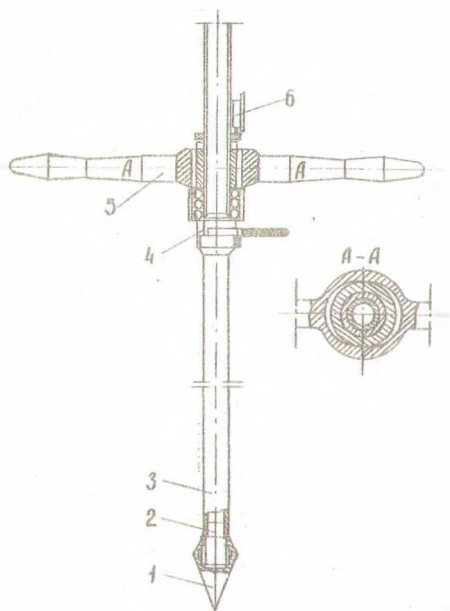


Рис. 6 Пенетромтр П-4 конструкции Л.С.Амаряна

- 1 - конусный наконечник; 2 - стержень;  
3 - штанга; 4 - упор; 5 - рукоятка;  
6 - индикатор.

Прибором измеряются следующие величины:

- а) показания индикатора общие,  $\Delta l$ ;
- б) показания индикатора без конуса (для учета трения)  $\Delta l_{тр}$ ;
- в) глубины испытываемых слоев,  $H$ ;
- г) глубина погружения конуса,  $h$ ;
- д) нагрузка при вдавливании,  $p = \frac{\Delta l}{h}$ .

По удельному сопротивлению грунта  $\sigma'$  погружению конуса площадью  $10 \text{ см}^2$  различают [26] следующие типы консистенции (табл. I2):

Таблица I2. Типы консистенции

$\sigma', \text{кг/см}^2$	Консистенция
20 - 50	Тугопластичная
10 - 20	Мягкопластичная
< 10	Текучепластичная

Для зондирования торфяной залежи применяют также пенетрометр, разработанный в БедДорНИИ.

## Глава 2. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ НА ТОРФЯНЫХ ОСНОВАНИЯХ

### 1. Основные требования к конструкции земляного полотна на слабых грунтах

В большинстве случаев выбор варианта конструкции земляного полотна должен быть обоснован в индивидуальном проекте, включающем расчет элементов, а также необходимые указания по технологии строительства. При этом любой предлагаемый вариант должен удовлетворять определенным требованиям, соблюдение которых обеспечивает должное качество строительства и надежность в эксплуатации.

Основная задача проектирования дороги через болото заключается в обеспечении, в пределах перехода, заданных для трассы в целом технико-эксплуатационных показателей проезжей части. Поэтому возможность снижения стоимости благодаря применению более рациональных конструкций ограничивается земляным полотном или заменяющим его сооружением.

Конструкция земляного полотна автомобильных лесовозных дорог на участках слабых грунтов может предусматривать [43]:

- а) сооружение дорожной сети (усов, веток, магистралей) в комплексе с осушительной сетью;
- б) постройку магистралей и веток на неосушенных болотах;
- в) возведение насыпи с частичным или полным выторфовыванием.

На конструкцию насыпей (ширину, высоту, ширину обочины) оказывает существенное влияние род грунта, его водостойкость и механические свойства. Лучшими для насыпей являются дренирующие грунты. Ограниченность запасов или отсутствие дренирующих грунтов вызывает необходимость широкого использования местных недренирующих грунтов в земляном полотне автомобильных лесовозных дорог.

Дорожно-строительная классификация болотных залежей позволяет ориентировочно определить область применения различных типов конструкций земляного полотна, исходя из выполнения первого основного требования - обеспечения устойчивости.

Для повышения устойчивости основания могут быть использованы [15] следующие моменты: изменение конструкции насыпи путем уположивания откосов, устройства пригрузочных бERM; снижение нагрузки на основание (легкие насыпи); более равномерное распределение нагрузки на большей площади (применение сланей); повышение сопротивления сдвигу слабого грунта в период строительства (заблаговременное осушение, предварительная консолидация, ускорение консолидации с помощью дренирования; искусственное заглубление насыпи (частичное выторфывание).

Земляное полотно дорог на болотах независимо от того, на каком несущем основании оно возведено (на торфяном или минеральном грунте), работает в условиях водонасыщенной среды. Поэтому оно подвержено постоянному воздействию гидромеханических процессов. На неосушенных болотах, по условиям обводнения, различают [43] насыпи, подтопляемые подпорным горизонтом воды (по типу глухих пойменных дамб), и насыпи, подтопляемые водой, скапливающейся в пазухах, образованных прогибами поверхности болота (обводнение со свободным горизонтом воды). В обоих случаях в зоне обводнения уменьшаются плотность грунта, сопротивление сдвигу и объемный вес грунта на величину взвешивающего давления воды, заключенной в объеме пор.

При подтоплении в насыпи образуются три различных зоны увлажнения.

I - зона фильтрационного обводнения. Ее ограничивают с боков откосы насыпи, снизу - подошва насыпи, сверху - кривая депрессии, сопрягающая горизонты воды, находящейся по разным сторонам насыпи. Мощность и очертание этой зоны определяются конфигурацией сформировавшегося торфяного ложа и глубиной погружения насыпи в торф, т.е. весом насыпи, с одной стороны, и отметками воды в верхнем и нижнем бьефе, с другой.

Через зону фильтрационного обводнения силами миграции влаги происходит насильственное вторжение огромных масс воды в вышележащие зоны насыпи.

2 - зона капиллярного увлажнения находится выше первой зоны; ее мощность определяется высотой капиллярного поднятия воды в грунте насыпи.

3 - зона - верхняя часть насыпи, ограниченная сверху основной площадкой земляного полотна и верхней границей каймы капиллярного увлажнения. Увлажнение этой зоны происходит только атмосферными осадками. Возвышение низа дорожной одежды над границей капиллярного увлажнения во второй дорожно-климатической зоне в зависимости от грунта насыпи СНиП П-Д.6-62 предусмотрено 0,5-0,8 м - одинаковое для автомобильных дорог общего пользования и дорог промышленного транспорта.

Для уменьшения высоты насыпи необходимо понижение верхних границ зон фильтрационного и капиллярного увлажнения. Это может быть достигнуто за счет понижения подпорного уровня воды у насыпи, устройства каналов и водопропускных отверстий или фильтрующих участков в теле насыпи; укладки в насыпь хорошо дренирующих грунтов с минимальной высотой капиллярного поднятия; введения в конструкцию насыпи обязательного конструктивного элемента - прерывателя капиллярности - для разрыва гидравлической связи между зоной фильтрационного обводнения и зоной капиллярного увлажнения. Капиллярпрерыватель помещается выше верхней границы зоны фильтрационного обводнения так, чтобы верхняя отметка прерывателя капиллярности возвышалась над поверхностью болота или над горизонтом высоких вод в нем не менее 0,5 м. Этой же величиной руководствуются при назначении верхней отметки дренирующего грунта, укладываемого в погруженную часть комбинированных насыпей, у которых верхняя часть отсыпается из наддренирующего грунта. Капиллярпрерыватель конструктивно может быть выполнен в виде прослойки гравелистого песка или хворостяной подушки.

Насыпи на болотах должны [43] иметь три конструктивных элемента: надземную часть, часть, погруженную в торф (фундамент), и прерыватель капиллярности. Конструкция надземной части насыпи определяется родом грунта и геометрическими размерами, из которых ширина поверху - величина всегда заданная, а высота и заложение откосов являются величинами, зависящими от положения уровня грунтовой воды, гранулометрического состава; плотности и водостойкости грунта. Конструкция подземной части (фундамент) насыпи определяется родом грунта, ши-

риной понизу надземной части насыпи и величиной осадки. Последняя зависит от мощности торфяного основания, первоначальных механических свойств болотных грунтов и инженерной подготовки их.

Выбор индивидуальной конструкции земляного полотна на участке слабых грунтов должен обосновываться технико-экономическими расчетами. При этом расчеты проводят, используя более точные методы и уточненные значения механических характеристик грунтов, полученных при испытаниях в поле и в лаборатории.

При использовании слабых грунтов в основании насыпи необходимо учитывать в проекте возможность следующих видов деформации:

а) деформаций, связанных с превышением касательными напряжениями, возникающими в основании насыпи от внешних нагрузок, прочности (сопротивляемости сдвигу) грунта основания. Указанные деформации проявляются в виде выдавливания или выпирания грунта основания в стороны, за пределы подошвы насыпи (нарушение устойчивости основания);

б) деформаций, связанных с воздействием на грунт основания нормальных (сжимающих) напряжений, которые возникают в основании от внешней нагрузки, вызывают сжатие (уплотнение) грунта и связанную с этим осадку основания - первичную (фильтрационную) и вторичную (пластическую);

в) упругих деформаций, которые возникают в результате воздействия на основание насыпи транспорта, движущегося по поверхности полотна, и вызывают, при значительной их величине, преждевременный износ дорожных одежд автомобильных дорог.

Для учета этих деформаций наряду с общими требованиями, предъявляемыми к земляному полотну автомобильных дорог действующими СНиП, при проектировании насыпей на слабых грунтах должны быть соблюдены [26] следующие специальные требования: обеспечена устойчивость основания; установлена и по мере возможности снижена величина осадки; обеспечено завершение интенсивной части осадки в заданный срок; исключены недопустимые упругие деформации насыпи при движении транспорта.

Необходимым условием, обеспечивающим возможность ис-



пользования слабого грунта в основании проектируемой насыпи, является достаточная его устойчивость, в зависимости от которой различают три типа основания:

I - основания, не требующие специальных мероприятий по обеспечению устойчивости;

II - основания, для обеспечения устойчивости которых необходимо применение мер только технологического характера (соблюдение определенного режима отсыпки);

III - основания, которые требуют специальных конструктивных мер по обеспечению устойчивости (изменение конструкции насыпи или удаление слабого слоя).

Для поддержания необходимой прочности грунта в теле насыпи и сохранения ее устойчивости СНиП.Д-6-62, а также "Технические указания по проектированию лесозаготовительных предприятий" в качестве гарантийных мер нормируют возвышение основной площадки земляного полотна (или низа дорожной одежды) над уровнем грунтовых или уровнем поверхностных вод, стояние которых продолжается более 20 суток. Для пылеватых супесей и суглинков такая высота установлена в пределах I,2 - I,9 м.

Поскольку в лесах гидролесомелиоративного фонда положение горизонта воды находится в уровне с поверхностью земли или очень близко к ней, высота насыпи из пылеватых грунтов по критерию капиллярного увлажнения должна быть I,5-2,5 м (табл. I3)

Таблица I3. Минимальная высота насыпи

Начальная мощность слабого слоя, м	Минимальная толщина насыпного слоя, м
2	I,5
4	2,0
6	2,5
8 и более	2,5

Влияние капиллярного увлажнения грунта (табл. I4) на высоту насыпи может быть значительно ослаблено понижением уровня воды в грунте основания осушительными и водоотводя-

дами каналами необходимой глубины, введением капилляропрерывающей прослойки и др. мероприятиями.

Таблица 14. Опытные средние величины предельной высоты капиллярного поднятия воды в минеральных грунтах и торфе (по М. Я. Шапошникову)

Наименование грунтов	диаметр частиц, мм (для торфа степень разложения R, %)	Максимальная высота капиллярного поднятия, см	Число оуток
Песок крупнозернистый	2	11	30
То же	1	24	100
Песок среднезернистый	0,5	28	136
То же	0,3	33	188
Песок мелкозернистый	0,12	67	158
То же	0,072	89	144
Песок мелкозернистый	0,05	105	135
Пылевато-глинистые (илистые) грунты	0,047	135	160
То же	0,025	267	300
То же	0,016	310	375
Глина озерно-аллювиальная		400	475
Глина ленточная озерно-ледниковая		500	732
Торф верхового типа сфагновый неразложившийся	R < 20%	50	20
Торф осоково-сфагновый	R = 25-40%	25	60
То же	R > 40%	13	60

Особо ответственной частью проектирования земляного полотна является надлежащий выбор грунта для насыпей и способ его укладки при производстве работ.

Для автомобильных дорог требования к грунтам верхней части земляного полотна определяются СНиП П-Д.5-62.

Нижнюю часть на торфяных болотах рекомендуется устраивать из дренирующих грунтов в целях обеспечения устойчивости насыпи, ускорения осадки и исключения существенного нарушения режима болота.

При этом толщина слоя дренирующего грунта должна быть на 0,5 м больше расчетной величины осадки насыпи.

Крайне ограниченные запасы дренирующих грунтов, невозможность выбора наилучших из числа имеющихся на месте слабых минеральных и болотных разновидностей выдвигают необходимость выполнения при изысканиях подробных и тщательных инженерно-геологических исследований, на основании которых возможно разработать способы использования слабых минеральных и болотных грунтов.

Для проектирования земляного полотна на участках слабых грунтов должны быть известны следующие данные: общая мощность слабых отложений, мощность и расположение отдельных слоев, расчетные значения физико-механических характеристик грунтов; положение уровня грунтовых вод (с учетом возможных колебаний); высота насыпи (рабочая отметка), ее геометрические параметры и объемный вес грунта, а также данные о других физико-механических свойствах насыпи; величина расчетной подвижной нагрузки.

При расчетах оснований земляного полотна автомобильных дорог на участках слабых грунтов в общем случае учету подлежит усилие от веса насыпи и от подвижной нагрузки в необходимых случаях.

Откосы на переходе через болото в большой степени подвержены агрессивному влиянию поверхностных вод (особенно на затопливаемых участках), поэтому откосы круче 1:2 не рекомендуются [15]. В местах с наличием поверхностных вод откосы должны быть укреплены одерновкой или другими способами. При отсутствии открытых водных поверхностей обычно предусматривается плакировка откосов слоем торфа толщиной 10-20 см.

## 2. Расчет осадки оснований

Для оценки деформаций, которые могут возникнуть при возведении насыпи типового профиля на слабой толще без применения специальных конструктивных мер, требуется [26] провести следующие расчеты: определить величину конечной осадки, задавшись требуемой высотой насыпи в предположении бес-

печенной устойчивости основания; проверить устойчивость основания.

Существующие методы расчета осадки в большинстве своем основаны на результатах компрессионных испытаний залежи и, несмотря на некоторые отличия в исходных уравнениях компрессионных кривых, дают сравнительно точные для практики результаты.

Обычно для одномерной задачи используется метод расчета по компрессионным показателям без учета бокового расширения

$$S = H_0 \frac{\epsilon_0 - \epsilon_p}{\epsilon_0 + 1}, \quad (21)$$

где  $S$  - осадка;

$H_0$  - толщина расчетного слоя;

$\epsilon_0$  - начальный коэффициент пористости;

$\epsilon_p$  - коэффициент пористости после уплотнения заданной нагрузки  $P$ .

При неоднородности залежи величину осадки определяют отдельно для каждого слоя и полученные результаты суммируют.

При определении осадки торфа при компрессии удобно пользоваться модулем осадки (по Н.Н.Маслову), т.е. величиной осадки в мм на 1 м толщи:

$$l = S : H = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_p}{1 + \epsilon_0}. \quad (22)$$

Модуль осадки определяется опытным путем по результатам компрессионных испытаний торфа в одометрах в количестве, достаточном для статистического обобщения.

На основании экспериментальных исследований Н.К.Фенина, Л.А.Каткевичуса [39] и др. уплотнение (осадка) торфа  $R = 20-45\%$  при равномерно распределенной широкополосной нагрузке может быть принято в процентах от мощности сжимаемого слоя: при интенсивности нагрузки  $R < 0,06 \text{ кг/см}^2$  осадка равна 10%, при  $p = 0,06 \div 0,18 \text{ кг/см}^2$  осадка принимается 10-15%; при  $p = 0,18 \div 0,25 \text{ кг/см}^2$  осадка торфа происходит в пределах 15-25%, при  $p = 0,25 \div 0,50 \text{ кг/см}^2$  осадка равна 25-32%.

Другая группа расчета осадки основана на применении модуля общей деформации и, в некоторой степени, учитывает возможность бокового расширения и влияние на величину сжи-

маемости толщины слабого слоя.

Существуют еще и эмпирические методы, построенные на использовании корреляционных связей между исходными характеристиками состояния грунта и его деформационными свойствами.

К этой группе относится метод П.А. Дрозда, предлагающий использовать эмпирическую зависимость модуля общей деформации торфа от его плотности и нагрузки.

Результаты натурной проверки методов прогнозирования осадки насыпей на болотах, проведенные БелДорНИИ по дорогам Белоруссии, выявили, что наиболее точные данные для низинных залежей малой плотности получаются по методу П.А. Дрозда, а для верховых - А.А. Ткаченко.

П.А. Дрозд использует для расчета осадки формулу

$$S = \frac{B \cdot P}{\epsilon_{1\rho_0}} \omega t^{\frac{n}{b}} \sqrt{\frac{\rho_0}{P}} 10^{b(P - \rho_0)} \quad (23)$$

- где  $B$  - ширина полосовой нагрузки, см;  
 $P$  - удельная нагрузка на торф, кг/см<sup>2</sup>;  
 $\epsilon_{1\rho_0}$  - величина модуля сжатия, может быть определена в зависимости от плотности;  
 $\omega$  - коэффициент, определяемый по таблице М.И. Горбунова-Посадова;  
 $n, b$  - эмпирические коэффициенты;  
 $\rho_0$  - предел пропорциональности для торфа, кг/см<sup>2</sup>;  
 $t$  - расчетное время действия нагрузки, ч.

Для расчетов по формуле (23) необходимо иметь лишь величину средневзвешенной по глубине залежи плотности торфа, выраженной объемным весом твердой фазы.

В Калининском политехническом институте в основу расчета компрессионных свойств торфа предлагают [22] уравнение, достаточно близко аппроксимирующее реальные компрессионные кривые

$$\epsilon = \epsilon_n - \frac{\sqrt[3]{P + G_0} - \sqrt[3]{G_0}}{\sqrt[3]{C}} \quad (24)$$

- где  $P$  - удельная нагрузка, кг/см<sup>2</sup>;  
 $G_0$  - параметр, связанный с началом отсчета координат и имеющий размерность давления. Численное значение параметра  $G_0$  равно 0,1 кг/см<sup>2</sup> для всех видов торфа;  
 $C$  - модуль компрессии, кг/см<sup>2</sup>.

Физически смысл модуля компрессии можно представить как удельную нагрузку, вызывающую изменение пористости на единицу. Проведенный в институте обширный количественный анализ компрессионных кривых различного ботанического состава и степени разложения показал, что  $C$  может быть определено по корреляционным уравнениям, представленным в табл. 15.

Таблица 15. Определение модуля компрессии

$\%, R$	Корреляционное уравнение	Диапазон измерения $\epsilon_n$
15-20	$\sqrt[3]{C} = \frac{0,034(34 - \epsilon_n)}{\epsilon_n - 3,08}$	6,5-22
20-30	$\sqrt[3]{C} = \frac{0,033(34 - \epsilon_n)}{\epsilon_n - 3,63}$	6,5-22
30-45	$\sqrt[3]{C} = \frac{0,033(34 - \epsilon_n)}{\epsilon_n - 4,3}$	5,5-22

Таким образом, прогнозирование компрессионных свойств торфа производится без больших затрат труда и времени по начальному коэффициенту пористости, используя последний как меру деформируемости торфа.

Уравнение (24) является справедливым в диапазоне от 0 до I кг/см<sup>2</sup>.

Величина относительной деформации при нагрузке до I кг/см<sup>2</sup> может достигать 50-75% от максимальной деформации. Поэтому необходимо учитывать основные факторы, влияющие на течение деформации, в частности, бытовые давления, распределение напряжений по глубине залежи, ограниченное расширение торфа при нагружении и т.д.

Дальнейшая тенденция развития методов прогноза величины осадки предполагает учет неоднородности торфяного слоя по степени уплотнения, возникающей в процессе консолидации и приводящей к тому, что слои, расположенные ближе к дренирующей поверхности, оказываются более уплотненными, и следовательно, менее водопроницаемыми. При этих условиях существенное значение может приобрести боковая фильтрация, так как примыкающие с обеих сторон к насыпи зоны торфяного основания остаются практически неуплотненными и, следовательно, доста-

точно водопроницаемыми. Учет этого обстоятельства может несколько приблизить результаты расчета к данным практических наблюдений, свидетельствующих о том, что реальные осадки всегда проходят быстрее, чем это следует из расчета.

### 3. Устойчивость основания

В процессе проектирования земляного полотна на слабом основании необходимость в проверке устойчивости возникает неоднократно. Предварительный расчет проводится уже при выборе типа конструкции. На этом этапе можно использовать табличные показатели сопротивления сдвигу грунта основания. Далее, расчет устойчивости необходим при окончательном назначении размеров конструктивных элементов земляного полотна, а в отдельных случаях — для обоснования дополнительных конструктивных или технологических мероприятий по повышению устойчивости.

На предварительном этапе, зная примерную величину сцепления грунта основания  $C$ , безопасную нагрузку можно определить по формуле Н.Н.Маслова

$$P_{без} = kC_0 \quad (25)$$

Так как

$$P_{расч} = \gamma_n (h_n + S), \quad (26)$$

где  $\gamma_n$  — средний объемный вес насыпного слоя;  
 $h_n$  — проектная высота насыпи;  
 $S$  — предполагаемая величина осадки.

Коэффициент устойчивости определяется из выражения

$$K_{уст} = \frac{P_{без}}{P_{расч}} = \frac{kC_0}{\gamma_n (h + S)} \quad (27)$$

Если полученный в результате предварительной проверки коэффициент устойчивости больше единицы, то конструкцию насыпи, возведенной на торфе, можно считать надежной и не предусматривать дополнительных мероприятий по повышению устойчивости.

Если  $K_{уст}$  окажется меньше единицы, расчет следует повторить при более строгих условиях, поскольку в формуле (27) не учитывается угол внутреннего трения грунта, ширина и форма сечения насыпи и мощность слабого слоя.

В СоюзДорНИИ В.Д.Казарновским предложено [18] учитывать форму эпюры загрузки, мощность сжимаемого слоя и наличие внутреннего трения путем введения в расчет коэффициента  $\beta$ , который представляет функцию этих параметров. С помощью ЭВМ им получены значения  $\beta$  для наиболее характерных исходных условий (рис.7).

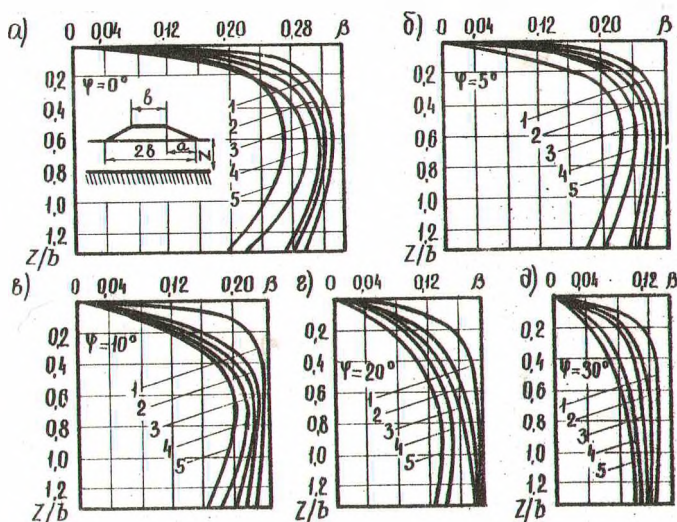


Рис. 7 Графики определения значений функции  $\beta$  при различных величинах  $\psi$ . Каждая из кривых на графиках соответствует следующим значениям  $\frac{2a}{b}$  :  
 1 - 0,2; 2 - 0,6; 3 - 1,0; 4 - 3,0;  
 5 - 10,0



Безопасная нагрузка с использованием коэффициента равна

$$P_{\text{без}} = \frac{C_0}{\beta} \quad (28)$$

Из графиков видно, что величина  $\frac{1}{\beta}$  изменяется в пределах от бесконечности до  $\tilde{\mu}$ , следовательно, расчет по формуле (27) в любом случае даст большую величину безопасной нагрузки, чем по формуле (28).

#### 4. Определение типа основания в зависимости от устойчивости

В зависимости от величин коэффициента безопасности, определенных для условий быстрой и медленной отсыпки, основание в целом относят [26] к одному из трех типов в соответствии с табл. 16.

К I типу слабая толща относится в том случае, когда коэффициент безопасности при быстрой отсыпке насыпи больше или равен I, т.е. имеется возможность использовать слабую толщу в качестве основания насыпи проектируемой высоты, не опасаясь нарушения устойчивости.

К типу II А слабую толщу можно отнести в том случае, когда коэффициент безопасности при быстрой отсыпке меньше I, но при медленной отсыпке больше или равен I. Тогда слабую толщу можно использовать в качестве основания, назначая определенный режим отсыпки.

К типу II Б слабую толщу относят в том случае, когда значение коэффициента устойчивости при расчете на медленную отсыпку сказывается в пределах 0,99 - 0,20. Тогда вопрос о возможности использования слабого грунта в основании, а также о конструкции и методах сооружения насыпи решается на основе данных лабораторных испытаний и расчетов.

К III типу толщу относят в том случае, если коэффициент безопасности даже при расчете на медленную отсыпку не превышает 0,2. В этом случае практически невозможно обеспечить достаточную устойчивость основания и необходимо удалить слабый грунт (полностью или наиболее слабый слой) или изменить

Таблица 16. Типы слабых оснований

Тип оснований	Определяющий признак	Характеристики устойчивости	Преобладавшие деформации грунта на наиболее опасного слоя	Возможность использования слабой толщи в качестве основания
I	$K_{\text{неч}} \geq 1$ $K_{\text{без}}$	Устойчивость обеспечена при любой скорости отсыпки насыпи	Сжатие	Можно использовать в качестве основания
II	A $K_{\text{неч}} < 1 \leq K_{\text{без}}^{\text{кон}}$	Устойчивость при быстрой отсырке не обеспечена, но обеспечена при медленной отсырке	При быстрой отсырке - сдвиг (выдавливание, выпор) при медленной - сжатие	Можно использовать в качестве основания при условии медленной отсыпки
	B $0,2 \leq K_{\text{без}} < 1$	Для окончательного суждения о степени устойчивости необходимы лабораторные испытания	-	-
III	$K_{\text{неч}}^{\text{кон}} < 0,2$ $K_{\text{без}}$	Устойчивость не может быть обеспечена ни при какой степени консолидации	Сдвиг (выдавливание, выпор)	В качестве основания использовать нельзя (необходимо удалить слабый слой)

$K_{\text{неч}}^{\text{кон}}$  - коэффициент безопасности при быстрой отсырке насыпи  
 $K_{\text{без}}$  - коэффициент безопасности при медленной отсырке насыпи

конструкцию насыпи.

При использовании дорожно-строительной классификации (табл. I) торфяных грунтов для определения типа основания следует строительный тип А торфяного грунта относить к первому типу оснований, строительный тип Б торфяного грунта - ко второму А и второму Б типам оснований, а строительный тип В торфяного грунта - к третьему типу оснований.

### Глава 3. НАПРЯЖЕНИЯ В ОСНОВАНИИ НАСЫПЕЙ

#### 1. Применение принципа линейной деформируемости к болотным грунтам

В отличие от других сооружений дороги могут работать в условиях значительной деформации основания. Основная задача заключается не в предотвращении или ограничении осадки, в разработке конструктивных и технологических мероприятий, благодаря которым изменение отметки основания не повлияет на эксплуатационные качества дороги.

Это возможно, если строители будут располагать надежными методами расчета величины конечной осадки, затухания деформации сжатия во времени, величины и характера упругих прогибов под транспортной нагрузкой.

К настоящему времени, как уже было сказано, разработано несколько способов определения конечной осадки по исходным характеристикам торфа. А что касается осадки во времени, то до сих пор не получено общего решения в части учета длительности осадки.

Вопрос учета длительности осадки невозможен без оценки напряженного состояния основания земляного полотна.

В настоящее время для расчета напряжений и деформаций в минеральных грунтах широко применяются методы теории упругости. Применимость таких методов к грунтам доказана [10] в пределах их линейной деформируемости, т.е. в диапазоне нагрузок примерно до  $4 \text{ кг/см}^2$ , что вполне удовлетворяет запросы практики. При доказательстве учитывалось, что в заданном диапазоне нагрузок изменение коэффициента пористости является малой величиной по сравнению с начальным его значением, т.е. предполагалась сравнительно небольшая деформируемость грунта.

Болотные грунты резко отличаются от минеральных очень рыхлым сложением и большой деформируемостью под нагрузкой, что вызывает сомнения в отношении возможности применения для них теории линейно-деформируемых сред.

Однако, несмотря на чрезвычайно рыхлое сложение и высокую влажность, всем видам болотных отложений свойственна не-

которая структурная прочность, обусловленная связностью водноколлоидной природы и жестким структурным сцеплением с характером необратимых связей [25]. Поэтому даже очень рыхлые и водонасыщенные болотные грунты обычно без нарушения структуры не текут, хотя влажность их, как правило, превышает предел текучести. Большую роль в этом играет наличие растительных остатков, связывающих отдельные агрегаты и обеспечивающих известную структурную прочность грунта в целом.

Несмотря на существенные отличия болотных отложений, основные закономерности механики грунтов под нагрузкой подчиняются тем же закономерностям, что и для минеральных, особенно связных (глинистых) грунтов.

Анализ компрессионных кривых, сделанный в БелНИИ мелиорации и водного хозяйства, показывает, что принцип линейной деформируемости болотных грунтов с момента начала испытаний сохраняется в диапазоне нагрузок  $0,2-0,5 \text{ кг/см}^2$ , а в отдельных видах более плотных отложений до  $1 \text{ кг/см}^2$ .

Таким образом, в определенном диапазоне нагрузок принцип линейной деформируемости применим к болотным грунтам в той же мере, как и к минеральным.

Практически насыпи на болотах возводятся слоями толщиной не более  $0,5-1,0 \text{ м}$ , что на каждой ступени увеличивает нагрузку на основание на величину около  $0,1-0,2 \text{ кг/см}^2$ . С постепенным уплотнением диапазон нагрузок, где применим принцип линейной деформируемости, значительно расширяется. Все это говорит о том, что для расчета напряжений в болотных грунтах можно использовать известные решения теории упругости. Исследования, проведенные П.А. Дроздом, показали, что и слоистое строение болота не вносит существенных изменений в характер распределения напряжений, вследствие небольшого отличия в жесткости слоев. Даже при измерении напряжений в такой слоистой системе, как песок на торфе, существенных различий в распределении напряжений по сравнению с однородной средой не обнаружено [12].

Таким образом, при определении напряжений в торфяном основании под действием насыпи можно выбрать расчетную модель линейно-деформируемой среды. В таком случае напряжения

в скелете грунта должны удовлетворять уравнениям теории упругости, которые, как известно из курса теории упругости, для случая плоской задачи могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$\nabla^2 (\sigma_x + \sigma_z) = \nabla^2 \Sigma = 0 \quad (30)$$

где  $\nabla^2$  - оператор Лапласа.

Принятие модели линейно-деформируемой среды позволяет для определения напряжения в основании земляного полотна использовать метод ЭГДА.

## 2. Сущность метода электроанalogии

В последнее время моделирование находит все большее распространение при изучении различного рода процессов, происходящих в грунтовых сооружениях. В основе моделирования лежит подобие явлений по ряду признаков. Теория подобия [20] предполагает наличие "уравнения связи" между подобными явлениями. Для большинства физических явлений уравнения связи найдены в форме дифференциальных уравнений, решения которых теория подобия не дает, а лишь делает выводы из них о свойствах подобных явлений.

В настоящее время открыто много математических аналогий между различными физическими явлениями в природе.

Такая аналогия существует, например, между течениями электрического тока в проводящей среде и фильтрацией жидкости в пористых средах и описывается одним и тем же уравнением (31)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ A_1(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_2(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = 0, \quad (31)$$

которое, в частности, при  $A_1(x, y) = A_2(x, y) = \text{Const}$  переходит в уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0. \quad (32)$$

При изучении того или иного конкретного физического явления функция  $u$  и коэффициенты  $A(x, y)$  в уравнении (31) будут изменять только свой физический смысл. Уравнение (31) можно решать аналитически и экспериментально. При аналитическом решении безразлично, какой физический смысл имеют величины  $u$  и  $A$ . При экспериментальном решении задач физическая природа изучаемого явления играет очень существенную роль, так как она определяет собою технические средства для осуществления эксперимента, точность и удобство измерений или фиксирования результатов, степень соответствия между идеализированной моделью явления, принятой при теоретическом рассмотрении и натурой и т.д.

Метод решения заданного уравнения путем экспериментального изучения какого-либо физического явления, описываемого этим уравнением, получил название метода аналогий.

Наиболее удобным при моделировании уравнения (31) оказалось экспериментальное изучение движения электрического тока в проводящей среде — метод электроаналогий.

Аналогия между электрическим током и фильтрацией жидкости наглядно иллюстрируется табл. I7.

Решение физической задачи, описываемой уравнением Лапласа, для некоторых случаев представляет большие математические трудности. Значительно проще найти экспериментальное решение для подобной электрической задачи, а потом при помощи простых переходных зависимостей распространить его на интересующую аналогичную задачу.

Универсальный интегратор типа ЭГДА-9/60 как раз и служит для экспериментального решения задач, описываемых уравнением (31).

Решение осуществляется методом математического моделирования на токопроводящей бумаге. В основе метода лежит принцип электроаналогий.

Интегратор в принципе представляет собой измерительный мост постоянного тока с выпрямителем для питания от сети переменного тока. Кроме того, в схему интегратора также

Таблица 17. Аналогия между электрическим током и фильтрацией жидкости

Электрический ток	Фильтрация
Электрический потенциал $u$	Пьезометрический напор $h$
Удельная проводимость $\sigma = \frac{1}{\rho}$	Коэффициент фильтрации $K$
Плотность тока $i$	Скорость фильтрации $V$
Закон Ома $i = -\sigma \frac{\partial u}{\partial t}$	Закон Дарси $V = -K \frac{\partial h}{\partial t}$
Уравнение Лапласа для электрического потенциала $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$	Уравнение Лапласа для напора $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$
Граничные условия	Граничные условия
Изоляционная поверхность $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ , где $n$ - нормаль	Поверхность водоупора $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$ , где $n$ - нормаль
Интеграл уравнения Лапласа (функция потенциала) $u = f(x, y, z)$	Интеграл уравнения Лапласа (напорная функция) $h = f(x, y, z)$
Эквипотенциальная поверхность $u = \text{const}$	Поверхность равных напоров $h = \text{const}$
Сила тока $I$	Фильтрационный расход $Q$
Площадь сечения $F$	Площадь сечения $\omega$
Длина линии тока $L$	Длина пути фильтрации $l$
Напряженность электрического поля $E = \frac{u_1 - u_2}{L}$	Градиент фильтрационного потока $j = \frac{h_1 - h_2}{l}$

входят потенциометрический делитель напряжения, необходимый для реализации граничных условий, и ампервольтметр для измерения режима работы интегратора и определения электрических параметров модели задачи, выполненной из электропроводной бумаги.



При моделировании различных задач должны соблюдаться условия подобия. Например, при изучении движения грунтового потока на элетромоделях необходимо соблюдать следующие условия подобия: электрическая модель должна представлять изучаемую область фильтрации в некотором масштабе  $m$  без всякого искажения; коэффициенты электропроводности  $\sigma(x^*, y^*)$  в модели должны быть пропорциональны соответствующим коэффициентам фильтрации  $\alpha(x, y)$ , т.е. между моделью и натурой должно существовать физическое подобие  $\sigma(x^*, y^*) = n \alpha(x, y)$ , где  $n$  - коэффициент физического подобия; граничные условия для модели и природы должны быть подобны, т.е. связаны между собой линейной зависимостью.

Для однородной среды условие физического подобия имеет место при любом значении  $\sigma$ , т.е. выполняется автоматически, поэтому при моделировании в однородной среде необходимо только позаботиться о соблюдении геометрического подобия и подобия граничных условий. При моделировании удобно пользоваться приведенными (безразмерными) величинами. В качестве приведенной единицы потенциала считают разность потенциалов на выходе питающего устройства интегратора, т.е. минимальное и максимальное значение рабочего напряжения  $\varphi = 0$  и  $\varphi = 1$ . Тогда все измерения будут производиться в долях (или процентах) от максимального рабочего напряжения. При наличии аналогии между электрическим потенциалом  $\varphi$  и другой величиной  $u$  наблюдается зависимость

$$\varphi = au + b \quad (33)$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются так, чтобы двум заданным значениям  $u_0$  и  $u_1$  величины  $u$  в натуре соответствовали приведенные потенциалы  $\varphi = 0$  и  $\varphi = 1$  на модели.

Тогда 
$$u_0 = u_{\min}, \quad u_1 = u_{\max}$$

$$au_0 + b = 0 \quad (34)$$

$$au_1 + b = 1 \quad (35)$$

Решив уравнения (34) и (35), получим:

$$\alpha = \frac{1}{u_1 - u_0}, \quad \beta = \frac{u_0}{u_1 - u_0}. \quad (36)$$

Тогда

$$\varphi = \frac{u - u_0}{u_1 - u_0}. \quad (37)$$

В результате

$$u_1 = u_0 + (u_1 - u_0)\varphi \quad (38)$$

или

$$u = u_{\min} + (u_{\max} - u_{\min})\varphi \quad (39)$$

Формула (39) является основной при моделировании различных задач и служит для перехода от электрических величин к искомым величинам.

### 3. Исходные данные для моделирования

При проектировании модели напряженной области необходимо схематизировать геологические данные, установить границы исследуемой области, выбрать масштаб модели, электропроводный материал и шины, установить удельное давление, высоту и ширину насыпи и, наконец, составить чертёж модели.

Для определения напряжения и осадки торфяного основания земляного полотна конструктивная схема сооружения прежде всего должна быть заменена расчетной схемой [36], учитывающей как особенности конструкции сооружения, так и особенности распределения усилий от действия постоянной и временной нагрузок (рис.8). Трапецидальное сечение насыпи иногда приблизительно заменяют равновеликим по площади треугольником, имеющим высоту, равную высоте насыпи.

При установлении высоты насыпи необходимо учитывать транспортную нагрузку. Высота насыпи по условию минимального воздействия поездной нагрузки оказывает существенное влияние на основание насыпи.

Исследования А.А.Фаденко [37, 38] показали, что распределение нормальных напряжений  $\sigma_z$  в умеренно увлажненном грунте от действия подвижной колесной нагрузки происходит неодинаково.

На дороге с гравийным покрытием изменение  $\sigma_z$  по глубине до 50-60 см близко к теоретической кривой Буссинеска для упругого однородного полупространства, при этом влияние песчано-гравийного слоя проявляется дискретно: при нагрузке на колесо 2300 кг гравийный слой обладает небольшой распределяющей способностью и уменьшает давление на основание в среднем на 15% в сравнении с теоретическим, при нагрузке на колесо 2600-5000 кг в гравийном слое происходит концентрация напряжений и на основание передается нагрузка в среднем на 10% больше теоретической.

На дороге без покрытия при нагрузке на колесо 1000-5000 кг изменение  $\sigma_z$  до глубины 50-60 см подчиняется теоретическому распределению.

Начиная с глубины 50-60 см, в обоих случаях рассеивание нормальных напряжений  $\sigma_z$  в связном грунте происходит более интенсивно, нежели по теоретическому уравнению Буссинеска. Внутреннее давление в шине, ее размеры и конструкция практически не изменяют указанные выше закономерности распределения  $\sigma_z$  по глубине.

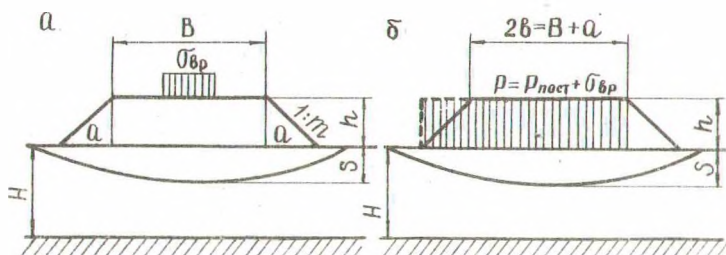


Рис. 8. Распределение нагрузки на основание насыпи:

а - общая конструктивная силовая схема земляного полотна на торфяном грунте; б - расчетная схема.

Результаты, полученные А.А.Фаденковым и М.А.Шапошниковым, могут быть использованы для выбора высоты насыпи по минимальной величине давления, возникающего на подошве насыпи от действия собственного веса грунта и поездной нагрузки (табл.18).

Таблица 18. Нормальные  $\sigma_z$  и касательные напряжения в грунте на различных глубинах от основной площадки насыпи при проходе автопоезда (по экспериментальным данным А.А.Фаденкова в обработке М.А.Шапошникова)

Высота насыпи	Песчано-гравийное покрытие 58 см, насыпь из легкого глинистого грунта					Насыпь из легкого глинистого грунта без покрытия				
	Поездная нагрузка $P_1$	Нагрузка насыпи $P_2$	$\frac{\sigma_z}{\gamma H}$	$tg \beta$	$\tau$	Поездная нагрузка $P_1$	Нагрузка насыпи $P_2$	$\frac{\sigma_z}{\gamma H}$	$tg \beta$	$\tau$
Автопоезд МАЗ-501, нагрузка на колесо 4820 кг, давление в шине 5 атм, давление на поверхность дороги 5,21 кг/см <sup>2</sup>										
0,26	2,64	0,05	2,69	0,31	0,83	2,52	0,05	2,57	0,31	0,80
0,50	1,02	0,10	1,12	0,78	0,87	0,98	0,09	1,07	0,97	1,03
0,70	0,40	0,14	0,54	1,43	0,77	0,40	0,13	0,53	1,60	0,85
1,0	0,14	0,19	0,33	1,5	0,51	0,14	0,18	0,32	1,88	0,60
1,25	0,12	0,24	0,36	1,73	0,62	0,12	0,23	0,35	1,90	0,66
1,5	0,09	0,28	0,37	1,73	0,64	0,09	0,27	0,36	1,90	0,68
2,0	0,07	0,37	0,44	1,73	0,76	0,07	0,36	0,43	1,90	0,82
2,5	0,06	0,46	0,52	1,73	0,90	0,09	0,45	0,51	1,90	0,97
3,0	0,05	0,55	0,60	1,73	1,04	0,05	0,54	0,59	1,90	1,12
3,5	0,04	0,64	0,68	1,73	1,18	0,04	0,63	0,67	1,90	1,27
4,0	0,03	0,73	0,76	1,73	1,31	0,03	0,72	0,75	1,90	1,42
Автопоезд ЗИЛ -157, нагрузка на колесо 1948 кг, давление в шине 5,5 атм, давление на поверхность дороги 4,36 кг/см <sup>2</sup>										
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,26	1,25	0,05	1,30	0,78	1,01	1,51	0,05	1,56	0,33	0,52
0,50	0,46	0,10	0,56	1,28	0,72	0,46	0,09	0,55	1,19	0,66
0,70	0,16	0,14	0,30	1,73	0,52	0,16	0,13	0,29	1,66	0,48
1,0	0,06	0,19	0,25	1,75	0,44	0,06	0,18	0,24	1,70	0,41
1,25	0,06	0,23	0,29	1,75	0,51	0,06	0,23	0,29	1,70	0,49

## Продолжение

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,5	0,05	0,28	0,33	1,75	0,58	0,05	0,27	0,32	1,70	0,55
2,0	0,04	0,37	0,41	1,75	0,72	0,04	0,36	0,40	1,70	0,68
2,5	0,03	0,46	0,49	1,75	0,86	0,03	0,45	0,48	1,70	0,82
3,0	0,02	0,55	0,57	1,75	1,00	0,02	0,54	0,56	1,70	0,95
3,5	0,01	0,64	0,65	1,75	1,14	0,01	0,63	0,64	1,70	1,09
4,0	0,01	0,73	0,74	1,75	1,30	0,01	0,72	0,73	1,70	1,24

Примечание: 1.  $\operatorname{tg} \beta$  - тангенс угла рассеивания внешней нагрузки по глубине насыпи или грунтового однородного полупространства;

2.  $\tau$  - касательные напряжения от вышележащей постоянной и временной нагрузки;

3.  $\sigma_z$  - нормальные напряжения до глубины 1,0 м измеренные, ниже - вычисленные;

4. Нагрузка  $\sum P$  и напряжения в  $\text{кг/см}^2$ .

Оптимальной по указанному признаку при эксплуатации автопоездов ЗИЛ, МАЗ и Краз является высота насыпи 1,0 м. А так как по критерию капиллярного увлажнения высота насыпи из пылеватых и глинистых грунтов должна быть 2-2,5 м, то специально учитывать действие поездной нагрузки на основании при расчете напряжения и осадки во времени для насыпей больше 1,0 м нет необходимости.

При построении модели высоту насыпи берем из табл.13. Для установления удельного давления насыпи необходимо решить вопрос о грунте насыпи.

Лучшими для насыпей являются дренирующие грунты, но запасы их ограничены. Повсеместное распространение имеют пылеватые и глинистые грунты, пригодность которых для возведения насыпей доказана многими исследованиями [36, 42].

Объемный вес влажной супеси колеблется в пределах 1,8-1,9 Г/см<sup>3</sup>. Исходя из этого, удельное давление определяют по табл.19.

Таблица 19. Удельное давление насыпи

Высота насыпи, м	Удельное давление насыпи, кг/см <sup>2</sup>	Удельное давление насыпи кг/см <sup>2</sup> с учетом транспортной нагрузки
1,5	0,285	0,375
2,0	0,380	0,440
2,5	0,475	0,520

Для окончательного установления размеров модели необходимо знать ширину земляного полотна.

По данным Гипролестранса [34] ширина земляного полотна на прямых участках автомобильных дорог лесозаготовительных предприятий должна назначаться согласно табл.20.

Таблица 20. Ширина земляного полотна

Виды дорог	Ширина земляного полотна, м
Магистраль лесовозных дорог:	
I категории	10,0
II категории	8,0
III категория	5,5
Лесовозные и лесохозяйственные ветки	5,0

Установив параметры насыпи и толщину торфа, необходимо установить масштаб модели.

При неоднородных грунтах основания можно принимать за водоупор слой грунта с коэффициентом фильтрации в 10 и более раз меньше коэффициента фильтрации вышележащего слоя. При этом принятый водоупор должен находиться на глубине не менее 0,5-1,0 длины горизонтальной проекции сооружения. Так как значения коэффициента фильтрации у торфа колеблются в широком диапазоне, то слой, подстилающий пласт торфа, не

всегда будет водоупором. Считаем, что болото не имеет водоупора, в этом случае форма модели близка к полукругности [40], радиус которой  $R = 2,5 B$ ,

где  $B$  - длина горизонтальной проекции насыпи. Форма модели обычно принимается в виде прямоугольника с размерами  $T = R$  и  $L = 2R$ . Масштаб модели лимитируется техническими возможностями изготовления ее. Масштаб моделей для насыпей высотой от 1,5 до 2,5 м приведен в табл. 2I

Таблица 2I. Размеры моделей

№ № модели	Габаритные размеры поперечных профилей моделируемых насыпей и глубина горфа, м					При- нятый масш- таб	Размеры модели, м			
	$b$	$a$	$B$	$h$	$H$		$B$	$T$	$L$	$H$
1	10,0	3	13	1,5	2	1:2 200	6,50	16,25	32,50	1,00
2	10,0	4	14	2,0	4		7,00	16,25	32,50	1,00
3	10,0	5	15	2,5	6		7,50	18,75	37,50	3,00
4	10,0	5	15	2,5	8		7,50	18,75	37,50	4,00
5	8,0	3	11	1,5	2		5,50	13,75	27,5	1,00
6	8,0	4	12	2,0	4		6,00	15,00	30,00	2,00
7	8,0	5	13	2,5	6		6,50	16,25	32,50	3,00
8	8,0	5	13	2,5	8		6,50	16,25	32,50	4,00
9	5,5	3	8,5	1,5	2		4,25	10,60	21,20	1,00
10	5,5	4	9,5	2,0	4		4,75	11,85	23,75	2,00
11	5,5	5	10,5	2,5	6		5,25	13,12	26,12	3,00
12	5,5	5	10,5	2,5	8		5,25	13,12	26,12	4,00
13	5,0	3	8	1,5	2		4,00	10,00	20,00	1,00
14	5,0	4	9	2,0	4		4,50	11,25	22,50	2,00
15	5,0	5	10	2,5	6		5,00	12,50	25,00	3,00
16	5,0	5	10	2,5	8		5,00	12,50	25,00	4,00

#### 4. Оценка напряженного состояния основания насыпей методом электродинамического моделирования

Так как интегратор типа ЭГДА-9/60 служит для решения задач, описываемых уравнением Лапласа, то с помощью этого прибора можно моделировать напряженное состояние основания земляного полотна от нагрузки, насыпи. Решение осуществляется методом математического моделирования на токопроводящей бумаге. В основе метода лежит принцип электроаналогии, описанный выше.

Профессор В.А.Флорин использовал метод ЭГДА, определив напряжение для случая произвольной вертикальной нагрузки, распределенной нормально к поверхности основания. Для определения напряжений в основании земляного полотна использованы его теоретические выводы.

При загрузке края полуплоскости вертикальной нагрузкой, распределенной по закону  $f(x)$ , сумма нормальных напряжений  $\Sigma = \sigma_x + \sigma_z$  является гармонической функцией, т.е. удовлетворяет уравнению Лапласа  $\nabla^2 \Sigma = 0$ . Кроме того, в рассматриваемых условиях при  $Z = 0$ , т.е. по краю полуплоскости, имеет место зависимость

$$(\sigma_x)_{z=0} = (\sigma_z)_{z=0} = f(x) \quad (41)$$

Поэтому для значений  $Z = 0$  функция  $\Sigma$  принимает значения, равные

$$\Sigma_{z=0} = (\sigma_x)_{z=0} + (\sigma_z)_{z=0} = 2f(x) \quad (42)$$

При неограниченном удалении от участков загрузки напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  и функция  $\Sigma$  должны стремиться к нулю.

Учитывая вышесказанное, можно определить в любой точке сумму нормальных напряжений. Другими словами, необходимо определить функцию  $\Sigma$ , удовлетворяющую уравнение Лапласа при соблюдении следующих контурных условий: при  $Z = 0$  функция

$\Sigma$  принимает значения, равные  $2f(x)$ ; для бесконечно удаленных точек функция  $\Sigma$  и ее производные обращаются в нуль.



Определение функции может быть выполнено экспериментально, используя для указанной задачи метод ЭГДА.

Для осуществления эксперимента по определению напряжений в основании были изготовлены модели из электропроводной бумаги (табл.2I). Внешние границы модели должны быть геометрически подобны внешним границам изучаемой области. Геометрическое подобие осуществляется выбранным масштабом модели.

Граничные условия осуществляются следующим образом: на участке модели, где происходит давление насыпи на основание, прикладывают шину с максимальным значением приведенного потенциала  $\varphi = I$ .

По сторонам насыпи, где нет нагрузки на основание, прикладывают на модели шины с нулевым значением приведенного потенциала  $\varphi = 0$ . Для реализации граничных условий шины с помощью коммутационных проводов подключаются к гнездам питающего устройства интегратора.

Готовую модель помещаем в рабочей части стенда интегратора. После реализации и проверки граничных условий находим эквипотенциальные точки внутри поля моделируемой области, путем прощупывания модели специальной иглой. Иглой фиксируются только те точки, в которых гальванометр не отклоняется от нулевого положения. Затем точки с равными потенциалами соединяем плавными кривыми, являющимися линиями равных приведенных потенциалов. Имея точки равных потенциалов  $\varphi$ , вычисляем сумму нормальных напряжений в этих же точках природы с помощью формулы (39).

Таким образом, в случае вертикальной нагрузки можно, используя установку ЭГДА, определить величину  $\Sigma$  суммы главных напряжений для любой точки полуплоскости, расположенной в пределах, отвечающих размерам электропроводной бумаги.

Для полного решения вопроса необходимо по найденным уже значениям  $\Sigma$  суммы главных напряжений в любой точке полуплоскости определить величины напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ . Искомые напряжения удовлетворяют уравнениям (29, 30) расчетной модели линейно-деформируемой среды.

Функцию  $\Sigma$ , удовлетворяющую уравнениям (30) и (31), считают известной из эксперимента.

Запишем уравнения для  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{1}{2} \Sigma + \Psi, \\ \sigma_z &= \frac{1}{2} \Sigma - \Psi,\end{aligned}\tag{43}$$

где  $\Psi$  - некоторая неизвестная пока функция.

Дифференцируя первое из уравнений (43) по  $x$ , а второе по  $z$  и вычитая одно из другого, находим

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z^2} = 0.\tag{44}$$

Подставляя в уравнение (44) выражение (43) и принимая во внимание, что  $\Sigma$  - функция гармоническая, получаем

$$\nabla^2 \Psi = \frac{\partial^2 \Sigma}{\partial z^2}.\tag{45}$$

Решение уравнения (45) может быть представлено в виде

$$\Psi = \frac{1}{2} z \frac{\partial \Sigma}{\partial z} + \Psi,\tag{46}$$

где  $\Psi$  - любая гармоническая функция. Из уравнения (43) следует, что при  $z = 0$  функция  $\Psi$  должна обращаться в нуль, так как при  $z = 0$  напряжения  $\sigma_x + \sigma_z = \frac{\Sigma}{2}$ . Вследствие же этого, из выражения (46) вытекает, что при  $z = 0$  функция  $\Psi$  также должна обращаться в нуль.

Для бесконечно удаленных точек все напряжения  $\sigma_x, \sigma_z$  и  $\tau_{xz}$ , а также и величина  $z \frac{\partial \Sigma}{\partial z}$  в случае местной нагрузки обращаются в нуль, поэтому и функция  $\Psi$  на бесконечности так же обращается в нуль.

Таким образом, значения функции  $\Psi$  по всему контуру равны нулю, вследствие чего функция  $\Psi$  по всей области полуплоскости равна нулю.

В результате окончательно получается

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{1}{2} \Sigma + \frac{1}{2} z \frac{\partial \Sigma}{\partial z}, \\ \sigma_z &= \frac{1}{2} \Sigma - \frac{1}{2} z \frac{\partial \Sigma}{\partial z}.\end{aligned}\tag{47}$$

Соответственно можно убедиться, что

$$\sigma_{xz} = -\frac{1}{2} z \frac{\partial \Sigma}{\partial x} \quad (48)$$

Определение значений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  и  $\sigma_{xz}$  может быть в соответствии с полученными результатами произведено графически на электропроводной бумаге после нанесения на нее полученных из эксперимента линий равных значений  $\Sigma$ .

Нанесенные на рис. 9 кривые представляют собой линии равных  $\Sigma$  при загрузке края полуплоскости равномерно распределенной нагрузкой.

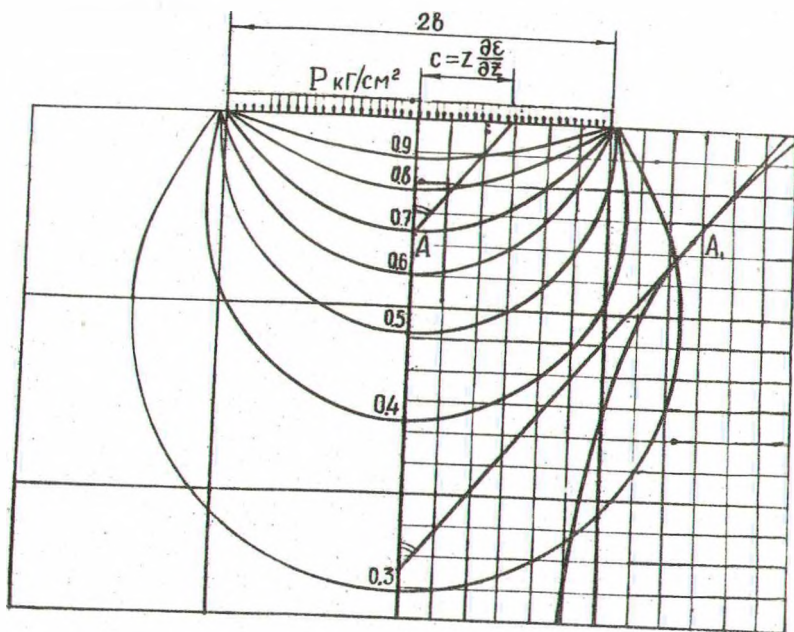


Рис. 9 Определение напряжений методом ЭГДА

Построим для оси кривую "К" изменения величины  $\Sigma$  в зависимости от изменения координаты  $Z$ . Тогда для определения напряжения  $\sigma_z$  в какой-то

точке  $A$  следует сначала отметить известную из эксперимента величину  $\frac{1}{2} \Sigma$  в этой точке, которую обозначим через  $\frac{1}{2} \Sigma_A$ . Затем следует провести к кривой "К" в точке  $A$  касательную, тангенс наклона которой к оси  $Z$  дает значение величины  $\frac{\partial \Sigma}{\partial Z}$  в точке  $A$ .

Проводя из точки  $A$  прямую, параллельную этой касательной до пересечения с осью  $X$ , получим, что отрезок  $C_A$  будет представлять в соответствующем масштабе значение  $Z \frac{\partial \Sigma}{\partial Z}$  в точке  $A$ . В результате искомое напряжение  $\sigma_z$  в точке  $A$  равно

$$\sigma_z = \frac{1}{2} \Sigma_A - \frac{1}{2} C_A \quad (49)$$

Для получения величины напряжения  $\sigma_x$  следует в правой части выражения (49) заменить лишь знак минус на плюс.

Определение касательного напряжения  $\tau_{xz}$  может быть произведено совершенно аналогично. В этом случае следует построить для какой-либо определенной глубины  $h$  кривую, представляющую изменение величины  $\Sigma$  в зависимости от изменения абсциссы  $x$ .

Определяя  $\frac{\partial \Sigma}{\partial x}$  как тангенс наклона касательной к оси  $x$ , легко определить графическим построением значение  $\tau_{xz}$  для любой точки полуплоскости.

В результате моделирования нами определены для различных условий напряжения в торфяном основании земляного полотна от действия насыпей и транспортной нагрузки. При этом наибольший интерес представляет определение значений  $\sigma_z$  и  $\Sigma$ ,

так как для обычно применяемых методов определения осадок необходимо иметь значения не всех составляющих напряжений в отдельности, а только значения для  $\sigma_z$  и  $\Sigma$ .

5. Графики для определения напряжений в основании земляного подотна

Представленные графики позволяют определить величину суммы главных напряжений и ее составляющих  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  и  $\tau_{xz}$ , возникающих в любой точке грунтового массива от нагрузки насыпи, приложенной нормально к поверхности основания.

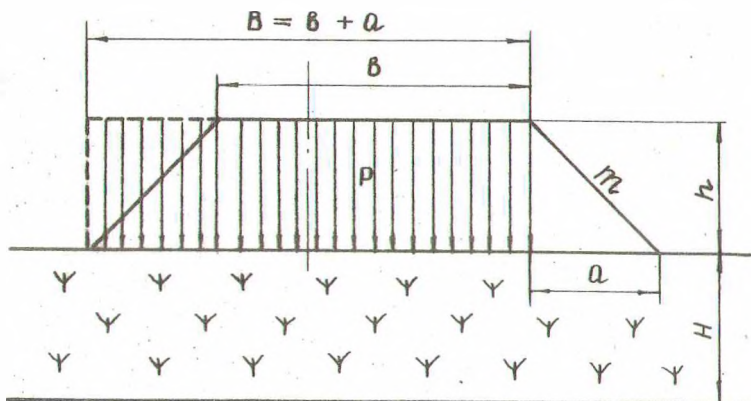


Рис. 10 Схема приложения нагрузки

Значения сумм напряжений  $\Sigma$  и  $\sigma_z$  вычислены для тех точек основания по оси приложения нагрузки, через которые прошли эквипотенциальные линии. Для промежуточных точек эквипотенциальные линии находят интерполяцией.  $\sigma_x$  и  $\tau_{xz}$  находят способом, описанным выше.

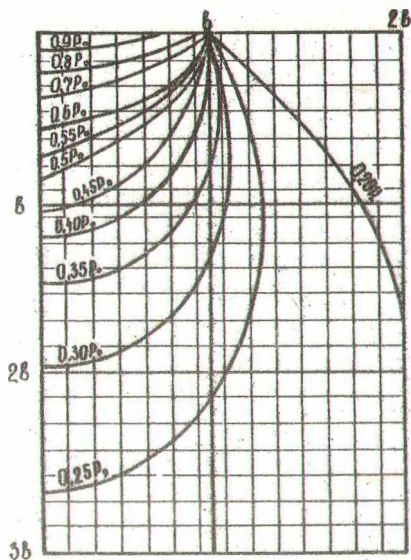


Рис. II Графики значений  $\Sigma$  при  
 $B=13\text{м}; h=1,5\text{м}; H=2\text{м}; P_0=$   
 $= 0,375 \text{ кг/см}^2$

Таблица 22. Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	0,6	0,337	0,150
0,80	1,5	0,300	0,116
0,75	2	0,281	0,095

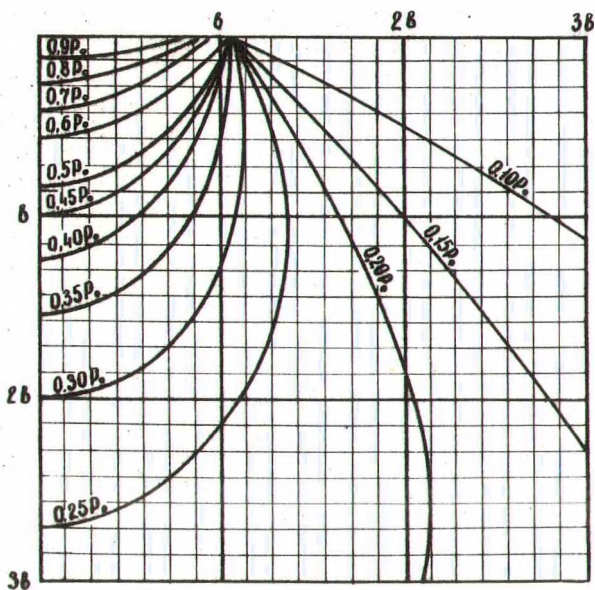


Рис. 12 Графики значений  $\Sigma$  при  $B=14\text{м}$ ;  
 $H=4\text{м}$ ;  $h=2\text{м}$ ;  $P=0,440 \text{ кг/см}^2$

Таблица 23. Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	1,0	0,396	0,175
0,80	1,8	0,352	0,133
0,70	2,9	0,308	0,091
0,60	4,0	0,264	0,069

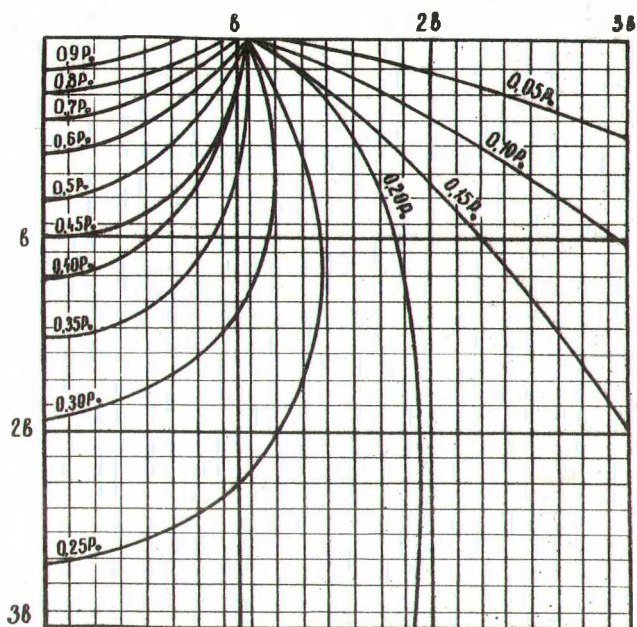


Рис. 13 Графики значений  $\Sigma$  при  $V=15\text{м}$ ;  
 $H=8\text{м}$ ;  $h=2,5\text{м}$ ;  $P=0,520\text{ кг/см}^2$

Таблица 24. Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	1,1	0,468	0,227
0,80	2,0	0,416	0,180
0,70	3,0	0,364	0,116
0,60	4,4	0,312	0,0078
0,50	6,0	0,260	0,064
0,45	7,5	0,234	0,0395



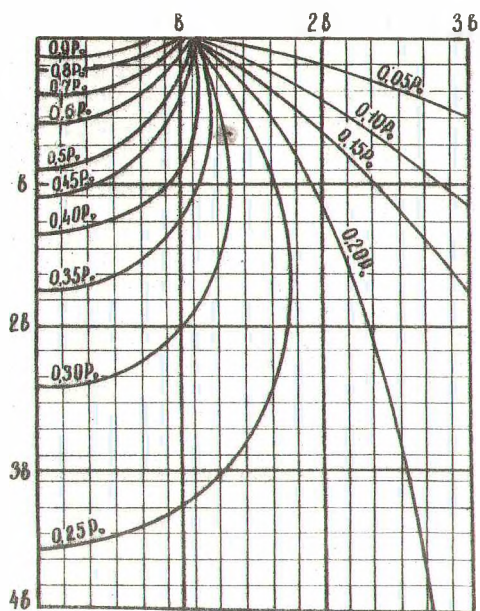


Рис. 14 Графики значений  $\Sigma$  при  $B=11\text{м}$ ;  
 $H=2\text{м}$ ;  $h=1,5\text{м}$ ;  $P=0,375\text{ кг/см}^2$

Таблица 25. Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,9	0,8	0,337	0,143
0,8	1,2	0,300	0,115
0,7	2,0	0,262	0,078

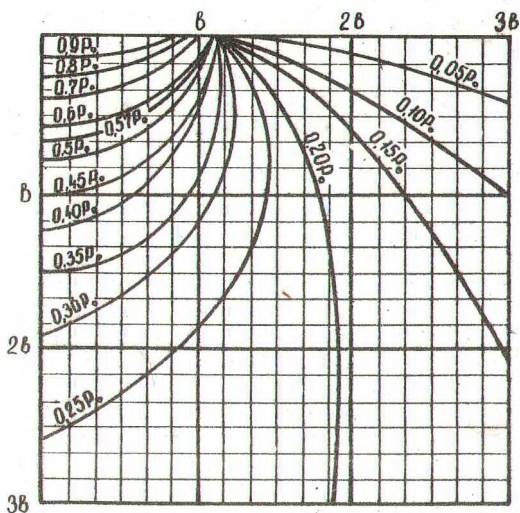


Рис. 15 Графики значений  $\Sigma$  при  $B=12\text{м}$ ;  
 $H=4\text{м}$ ;  $h=2\text{м}$ ;  $P=0,440 \text{ кг/см}^2$

Таблица 26. Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	0,8	0,396	0,173
0,80	1,5	0,352	0,135
0,70	2,4	0,308	0,089
0,60	3,6	0,264	0,068
0,57	4,0	0,251	0,066

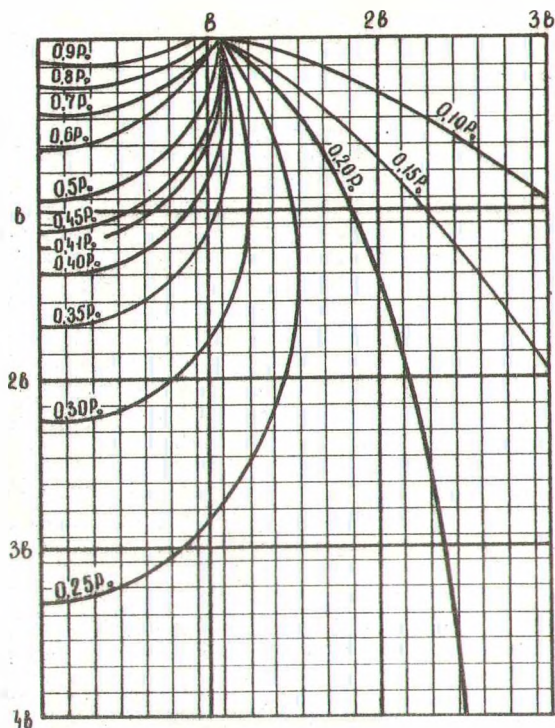


Рис. 16 Графики значений  $\Sigma$  при  $V=13\text{м}$ ;  
 $H=8\text{м}$ ;  $h=2,5\text{м}$ ;  $P=0,520\text{ кг/см}^2$

Таблица 27 Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	0,9	0,468	0,200
0,80	1,8	0,416	0,163
0,70	2,9	0,364	0,126
0,60	4,3	0,312	0,082
0,50	6,0	0,260	0,053
0,45	7,3	0,234	0,050
0,41	8	0,213	0,0366

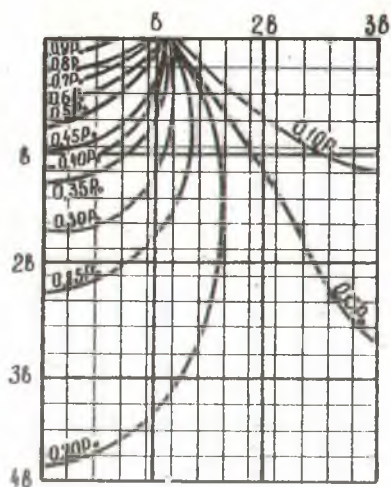


Рис. 17 Графики значений  $\Sigma$  при  $B=8,5\text{м}$ ;  
 $H=2\text{м}$ ;  $h=1,5\text{м}$ ;  $P=0,375\text{ кг/см}^2$

Таблица 28 Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	0,4	0,337	0,145
0,80	1,2	0,300	0,112
0,70	1,6	0,262	0,086

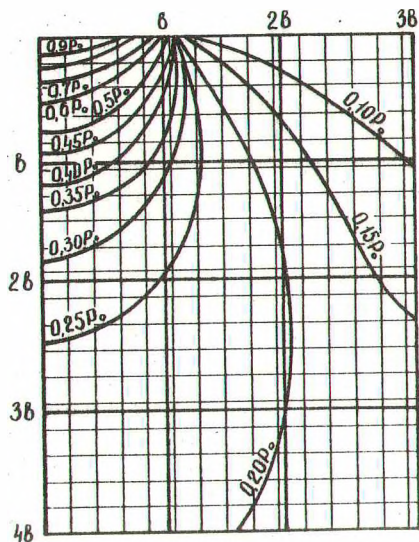


Рис. 18 Графики значений  $\Sigma$  при  $V=9,5\text{м}$ ;  
 $H=4\text{м}$ ;  $h=2\text{м}$ ;  $P=0,440\text{ кг/см}^2$

Таблица 29 Значения напряжений

Длины равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	0,6	0,396	0,168
0,80	1,2	0,352	0,138
0,70	1,9	0,308	0,099
0,60	2,6	0,264	0,074
0,50	3,8	0,220	0,057

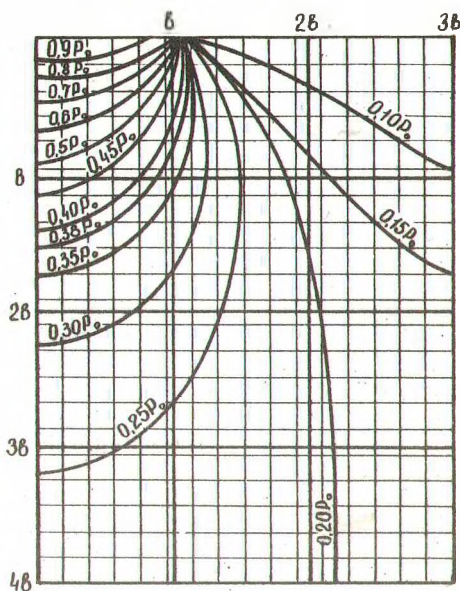


Рис. 19 Графики значений  $\Sigma$  при  $V=10,5\text{м}$ ;  
 $H=8\text{м}$ ;  $h = 2,5\text{м}$ ;  $P=0,520 \text{ кГ/см}^2$

Таблица 30 Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кГ/см <sup>2</sup>	
0,9	0,8	0,468	0,201
0,8	1,4	0,416	0,163
0,7	2,5	0,364	0,122
0,6	3,7	0,313	0,081
0,5	4,9	0,260	0,054
0,45	6,0	0,234	0,039
0,40	7,0	0,208	0,036
0,38	8,0	0,198	0,034

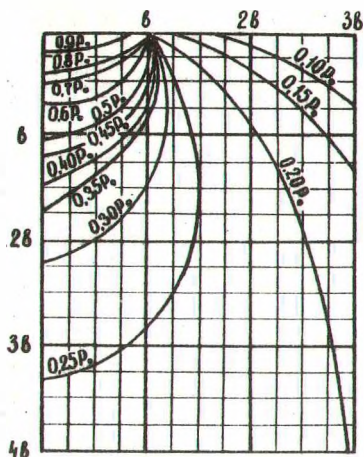


Рис. 20 Графики значений  $\Sigma$  при  $B=8\text{м}$ ;  
 $H=2\text{м}$ ;  $h=1,5\text{м}$ ;  $P=0,375 \text{ кг/см}^2$

Таблица 31 Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	0,7	0,337	0,142
0,80	1,4	0,300	0,113
0,70	2,0	0,262	0,082

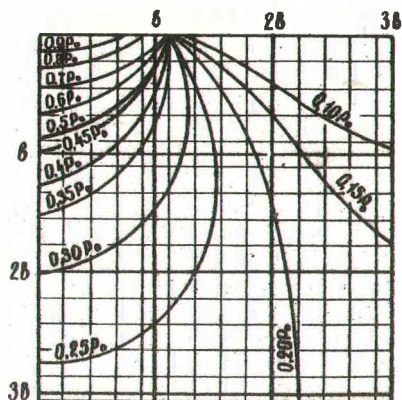


Рис. 21 Графики значений  $\Sigma$  при  $B=9\text{м}$ ;  
 $H=4\text{м}$ ;  $h = 2\text{м}$ ;  $P=0,440 \text{ кг/см}^2$

Таблица 32 Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	0,5	0,396	0,185
0,80	1,2	0,352	0,142
0,70	2,0	0,308	0,098
0,60	2,8	0,264	0,059
0,50	4,0	0,220	0,053



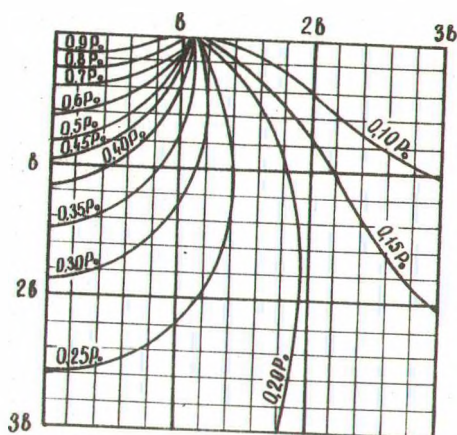


Рис. 22 Графики значений  $\Sigma$  при  $V=10\text{м}$ ;  
 $H=8\text{м}$ ;  $h=2,5\text{м}$ ;  $P=0,520\text{ кг/см}^2$

Таблица 33 Значения напряжений

Линии равных потен- циалов	Расположение ли- ний по глубине, м	$\Sigma$	$\sigma_z$
		кг/см <sup>2</sup>	
0,90	0,7	0,468	0,226
0,80	1,3	0,416	0,154
0,70	2	0,364	0,112
0,60	3,1	0,312	0,086
0,50	4,1	0,260	0,049
0,45	4,9	0,234	0,036
0,40	6,0	0,208	0,029
0,35	7,2	0,182	0,004

## Глава 4. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ОСАДКИ ОСНОВАНИЙ НАСЫПЕЙ

### I. Моделирование интенсивности осадки

Схема экспериментальной установки для определения интенсивности осадки по методу ЭГДА сводится к тому, чтобы воспроизвести движение воды в грунтовой массе в тех случаях, когда нагрузка передается не только на скелет грунта, но частично или полностью и на воду, заключенную в его порах. В таких случаях вода начинает перемещаться из зоны грунта, где имеется повышенный гидростатический напор, в зону с пониженным давлением.

Это перемещение воды происходит по соответствующим линиям токов. Объем воды, выжатый весом насыпи, соответствует величине осадки основания по оси насыпи, зависящей от времени.

Таким образом, при экспериментальных исследованиях создавались такие условия, при которых можно было бы воспроизвести движение воды в грунте под насыпью и измерить количество выжатой воды, а затем рассчитать величину и интенсивность осадки. Мы определяли искомые величины, проводя опыты не с грунтом, из которого выжимается вода, а с электропроводной бумагой, имеющей электропроводность, аналогичную с коэффициентом фильтрации грунта основания.

Через токопроводящую бумагу пропускали постоянный ток посредством особых шин, имитирующих распределение напряжений под насыпью. За основу модели брали графики распределения напряжений, приведенные выше. На кривые распределения напряжений наклеивали полоски медной фольги, вырезанные по форме изостатических кривых.

Схема модели приведена на рис. 22, где криволинейные шины обозначены буквами  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ .

Подаявая от источника тока на эти шины различные приведенные потенциалы, например 0,9; 0,8; 0,7; 0,6 и т.д. (закон изменения потенциалов связан с изменением напряжения по глубине основания), мы получили движение электрического тока от шин с большим потенциалом к шинам с меньшим потенциалом по соответствующим силовым линиям.

Эти силовые линии имеют то же направление, что и линии тока при выжимании воды из грунтовой массы. Они замыкаются на сборных шинах с отрицательным потенциалом, принятым эквивалентным нулевому напряжению.

Применение модели по описанному принципу [29] позволило определить все константы, необходимые для расчета осадки основания под воздействием земляного полотна.

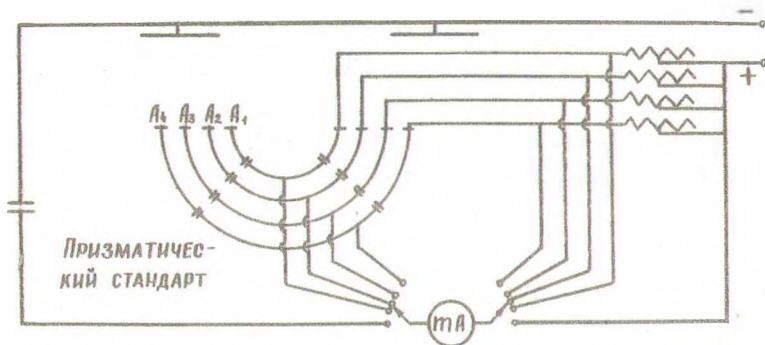


Рис. 22 Схема электрической модели для определения скорости осадки

Теоретическое определение скорости осадки насыпи посредством гидроэлектрических аналогий распадается на две части: определение общего расхода воды, выжимаемой из грунта, находящегося под насыпью; расчет по данным общего расхода воды скорости осадки насыпи.

Для простоты расчета определение расхода воды в случае плоской задачи производится для модели, представляющей собой призму из грунта с таким коэффициентом фильтрации  $K$  и размерами, чтобы общий фильтрационный расход воды при заданном напоре на погонную единицу был одинаков как для этой призмы, так и для сооружения в натуре.

Существует зависимость между расходом и силой тока для модели и сооружения в натуре, если соблюдается геометрическое подобие. Для этого величины коэффициентов фильтрации

грунта должны быть пропорциональны коэффициентам электропроводности бумаги.

Моделирование эквивалентной призмы осуществлялось путем наклейки на модель двух параллельных шин призматического стандарта.

Так как нас интересует расход воды в эквивалентной призме, то, пользуясь методом аналогии, можно определить его путем измерения силы тока в призматическом стандарте.

Величины, определенные моделированием, подставляются в формулу (50) для определения скорости осадки.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{V_0 P K b_0}{V_1 l_0 l_0 m} \frac{n l_1}{i b_1}, \quad (50)$$

- где  $V_0$  — напряжение в призматическом стандарте;  
 $P$  — удельное давление насыпи;  
 $K$  — коэффициент фильтрации;  
 $b_0$  — длина шины стандарта;  
 $V_1$  — напряжение в I-ой шине;  
 $l_0$  — длина пути фильтрации;  
 $m$  — масштаб модели;  
 $i$  — сила тока в шинах;  
 $b_1$  — длина шин.

В отличие от общепринятых соотношений размерность коэффициента фильтрации  $K$  в формуле (50) имеет вид  $[K] = \frac{c \cdot m^3}{c \cdot K}$

Это не соответствует обычно применяемой размерности коэффициента фильтрации и является результатом применения электрогидродинамических аналогий.

Полученные результаты позволяют определить изменение величины осадки во времени, прибегнув к отысканию некоторых параметров, входящих в формулу (51) для подсчета осадки во времени

$$S_t = S_{max} \left( 1 - e^{-\frac{vt}{S_{max}}} \right), \quad (51)$$

- где  $S_t$  — осадка насыпи во времени;  
 $S_{max}$  — стабилизированная осадка основания, м;  
 $t$  — время, год;

$e$  - основание натуральных логарифмов;

$V$  - скорость осадки, найденная моделированием на установке ЭГДА.

Значения осадок во времени, приведенные ниже, подсчитаны для тех же условий, что и графики напряжений.

## 2. Расчетные значения осадки во времени

Значения осадок во времени, приведенные в таблицах, определялись по формуле (5I). Стабилизированная осадка  $S_{max}$ , входящая в выражение (5I), принималась в процентах от мощности сжимаемого слоя в зависимости от величины прилагаемой нагрузки (2, гл.3). Скорость осадки  $V$  получили моделированием на интеграторе ЭГДА 9/60 для пяти различных коэффициентов фильтрации торфяного основания:  $0,8 \cdot 10^{-8}$ ;  $2 \cdot 10^{-8}$ ;  $4 \cdot 10^{-8}$ ;  $5 \cdot 10^{-8}$ ;  $0,015$  см/с.

Таблица 34. Значения  $S_t$  при  $B = 13$  м;  $H = 2$  м;  
 $h = 1,5$  м;  $P = 0,375$  кг/см<sup>2</sup>

$K$ , см/с	$t$ , год	$S_t$ , см	$K$ , см/с	$t$ , год	$S_t$ , см
1	2	3	1	2	3
$S_t = 60 (1 - e^{-0,478t})$			$S_t = 60 (1 - e^{-1,195t})$		
$0,8 \cdot 10^{-8}$	1	22,80	$2 \cdot 10^{-8}$	0,5	26,97
	2	36,90		1	41,84
	3	45,70		2	54,50
	4	51,10		3	58,33
	5	54,50		4	59,50
	6	56,59		5	59,85
	7	57,88		6	59,95
	8	58,69		7	59,98
	9	59,19	8	59,99	
	10	59,59	$S_t = 60 (1 - e^{-2,383t})$		
15	59,95	$4 \cdot 10^{-8}$	0,5	41,76	
20	59,99				

Продолжение

I	2	3	I	2	3
$4 \cdot 10^{-8}$	I	44,95	$S_t = 60 (1 - e^{-8,966t})$		
	2	59,49	0,015	0,083	31,48
	3	59,95		0,166	46,45
	4	59,95		0,25	53,61
$S_t = 60 (1 - e^{-2,988t})$		0,50		59,32	
$5 \cdot 10^{-8}$	0,5	46,53		0,83	59,96
	I	56,98		1,00	59,96
	2	59,85			
	3	55,99			

Таблица 35. Значения  $S_t$  при  $B = 14$  м;  $H = 4$  м;  
 $h = 2$  м;  $P = 0,440$  кг/см<sup>2</sup>

K, см/с	t, год	$S_t$ , см.	K, см/с	t, год	$S_t$ , см
I	2	3	I	2	3
$S_t = 120 (1 - e^{-0,107t})$			$2 \cdot 10^{-8}$	2	49,79
$0,8 \cdot 10^{-8}$	I	12,18		3	66,29
	3	32,95		4	78,92
	5	49,72		5	88,58
	7	63,25		6	101,61
	10	78,84		9	109,24
	12	86,77		10	111,77
	15	95,89		12	115,19
	20	105,88		15	117,84
	40	118,34		25	119,43
	60	119,80		30	119,96
80	119,98	35		119,99	
$S_t = 120 (1 - e^{-0,258t})$			$S_t = 120 (1 - e^{-0,537t})$		
	I	28,21	$4 \cdot 10^{-8}$	I	56,53
				2	79,00
				3	96,04

Продолжение

I	2	3	I	2	3
$4 \cdot 10^{-8}$	4	105,99	$5 \cdot 10^{-8}$	2	88,64
	5	111,81		3	103,97
	6	115,20		4	111,80
	7	117,20		5	115,81
	8	118,36		6	117,86
	9	119,04		7	118,90
	10	119,44		8	119,44
	12	119,81		9	119,71
	14	119,93		10	119,85
	15	119,96		14	119,99
$S_t = 120 (1 - e^{-0,671t})$			$S_t = 120 (1 - e^{-1,958t})$		
$5 \cdot 10^{-8}$	I	58,66	0,015	0,5	74,92
				1	103,06
				2	117,61
				3	119,66
				4	119,95
			5	119,99	

Таблица 36. Значения  $S_t$  при  $B = 15 \text{ м}$ ;  $H = 6 \text{ м}$ ;  
 $h = 2,5 \text{ м}$ ;  $P = 0,520 \text{ кг/см}^2$

$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$	$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$
I	2	3	I	2	3
$S_t = 192 (1 - e^{-0,109t})$			$S_t = 192 (1 - e^{-0,237t})$		
$0,8 \cdot 10^{-8}$	I	19,83	$2 \cdot 10^{-8}$	I	45,87
	3	53,55		3	107,35
	6	92,17		6	154,68
	8	111,72		8	170,38
	10	127,44		10	179,48
	15	154,57		15	188,80
	20	166,48		20	191,18
	50	191,17		30	191,95
	90	191,99			

Продолжение

I	2	3	I	2	3	
$S_t = 192 (1 - e^{-0,544t})$						
$4 \cdot 10^{-8}$	I	80,56	$5 \cdot 10^{-8}$	3	167,26	
	3	89,95		5	185,69	
	5	179,35		7	190,39	
	7	187,74		9	191,59	
	9	190,56		10	191,79	
	11	191,52		13	191,97	
	13	191,84		14	191,99	
	15	191,94		$S_t = 192 (1 - e^{-2,049t})$		
	18	191,99				
$S_t = 192 (1 - e^{-0,683t})$			0,015	0,5	123,0,4	
$5 \cdot 10^{-8}$	I	95,02		I	167,26	
				2	188,81	
				3	191,59	
			4	191,95		

Таблица 37. Значения  $S_t$  при  $B = 15$  м;  $H = 8$  м;  
 $h = 2,5$  м;  $P = 0,520$  кг/см<sup>2</sup>

$K$ , см/с	$t$ , год	$S_t$ , см	$K$ , см/с	$t$ , год	$S_t$ , см
I	2	3	I	2	3
$S_t = 256 (1 - e^{-0,072t})$			$S_t = 256 (1 - e^{-0,18t})$		
$0,8 \cdot 10^{-8}$	I	17,78	$2 \cdot 10^{-8}$	I	42,17
	3	49,73		3	105,32
	6	89,80		6	169,06
	8	112,09		8	195,34
	10	131,39		10	213,68
	15	169,06		15	238,79
	20	195,34		20	249,00
	50	249,00		30	254,84
	100	255,80		50	255,97
	130	255,99		55	255,99



Продолжение

I	2	3	I	2	3
$S_t = 256 (I - e^{-0,359t})$			$5 \cdot 10^{-8}$	3	189,63
$4 \cdot 10^{-8}$	I	77,22		6	238,79
	3	168,80		8	249,00
	6	226,30		10	253,15
	8	241,51		15	255,70
	10	248,93		20	255,97
	15	254,83	$S_t = 256 (I - e^{-1,351t})$		
	20	255,80	0,015	I	189,70
25	255,97	2		238,83	
27	255,99	3		251,55	
$S_t = 256 (I - e^{-0,450t})$				4	254,85
	I	92,77		5	255,70
				6	255,92
				7	255,99

Таблица 38. Значения  $S_t$  при  $B = 11 \text{ м}$ ;  $H = 2 \text{ м}$ ;  
 $h = 1,5 \text{ м}$ ;  $P = 0,375 \text{ кг/см}^2$

K, см/с	t, год	$S_t$ , см	K, см/с	t, год	$S_t$ , см
I	2	3	I	3	3
$S_t = 60 (I - e^{-0,507t})$			$2 \cdot 10^{-8}$	2	58,25
$0,8 \cdot 10^{-8}$	I	23,86		3	58,67
	3	46,89		4	59,62
	6	57,13		5	59,89
	8	58,96		6	59,97
	10	59,62		7	59,99
	13	59,92	$S_t = 60 (I - e^{-2,53t})$		
	15	59,97	$4 \cdot 10^{-8}$	0,5	43,06
18	59,99	I		55,22	
$S_t = 60 (I - e^{-1,269t})$				2	59,61
	I	43,13	3	59,97	

Продолжение

I	2	3	I	2	3
$S_t = 60 (1 - e^{-3,173t})$			$S_t = 60 (1 - e^{-9,519t})$		
$5 \cdot 10^{-8}$	0,5	47,71	0,015	0,083	32,77
	1	57,49		0,166	47,64
	2	59,89		0,25	54,44
	3	59,99		0,5	59,48
				0,83	59,98
				1,0	59,99

Таблица 39 Значения  $S_t$  при  $B = 12 \text{ м}$ ;  $H = 4 \text{ м}$ ;  
 $h = 2 \text{ м}$ ;  $P = 0,440 \text{ кг/см}^2$

K, см/с	t, год	$S_t$ , см	K, см/с	t, год	$S_t$ , см
I	2	3	I	2	3
$S_t = 120 (1 - e^{-0,167t})$			$S_t = 120 (1 - e^{-2,079t})$		
$0,8 \cdot 10^{-8}$	1	18,46	$4 \cdot 10^{-8}$	0,5	77,54
	3	47,29		1	104,99
	5	67,93		2	118,12
	7	82,72		3	119,76
	10	97,41		4	119,97
	13	106,3	5	119,99	
	15	110,20	$S_t = 120 (1 - e^{-2,607t})$		
20	115,75	$5 \cdot 10^{-8}$	0,5	87,39	
50	119,97		1	111,15	
			2	119,35	
$S_t = 120 (1 - e^{-1,042t})$			3	119,95	
$2 \cdot 10^{-8}$	1	77,67	$S_t = 120 (1 - e^{-7,821t})$		
	2	105,07	0,015	0,083	57,29
	3	114,73		0,166	87,23
	4	118,14		0,25	103,01
	5	119,34		0,5	117,59
	6	119,77		0,83	119,82
	7	119,92		1,0	119,99
	8	119,97			
	9	119,99			

Таблица 40. Значения  $S_t$  при  $B = 13 \text{ м}$ ;  $H = 6 \text{ м}$ ;  
 $h = 2,5 \text{ м}$ ;  $P = 0,520 \text{ кг/см}^2$

$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$	$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$	
$S_t = 192 (1 - e^{-0,128t})$			$4 \cdot 10^{-8}$	6	184,13	
$0,8 \cdot 10^{-8}$	1	23,07		6	187,85	
	3	61,22		7	189,81	
	5	90,76		9	191,39	
	7	113,62		10	191,68	
	10	138,62		11	191,83	
	15	163,85		12	191,91	
	20	177,16		15	191,99	
	50	191,68		$S_t = 192 (1 - e^{-0,802t})$		
	70	191,97		$5 \cdot 10^{-8}$	1	105,9
75	191,99	3	174,69			
$S_t = 192 (1 - e^{-0,32t})$			4		184,24	
$2 \cdot 10^{-8}$	1	52,58	5		188,52	
	3	118,48	6		190,44	
	5	153,23	7		191,30	
	7	171,56	8		191,69	
	10	184,17	9		191,86	
	15	190,42	10		191,94	
	20	191,68	$S_t = 192 (1 - e^{-2,407t})$			
	30	191,99	$0,015$	0,5	134,34	
	$S_t = 192 (1 - e^{-0,639t})$			1	174,70	
	1	90,66		2	190,44	
	2	138,51		3	191,86	
	3	163,77		4	191,99	
	4	177,09				

Таблица 4I. Значения  $S_t$  при  $B = 13$  м;  $H = 8$  м;  
 $h = 2,5$  м;  $P = 0,520$  кг/см<sup>2</sup>

$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$	$K, \text{ см/о}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$
$S_t = 256 (1 - e^{-0,095t})$			$S_t = 256 (1 - e^{-0,474t})$		
$0,8 \cdot 10^{-8}$	1	23,20	$4 \cdot 10^{-8}$	1	96,64
	3	63,48		2	194,24
	5	96,80		5	232,07
	7	124,35		7	246,73
	10	156,99		10	253,76
	15	194,43		15	255,79
	20	217,71	20	255,99	
	50	253,78	$S_t = 256 (1 - e^{-0,595t})$		
	80	255,87	$5 \cdot 10^{-8}$	1	114,80
100	255,99	2		178,12	
$S_t = 256 (1 - e^{-0,238t})$				3	213,04
$2 \cdot 10^{-8}$	0,5	28,72		4	232,31
	1	54,22		5	242,93
	2	96,96		10	255,33
	3	130,64	15	255,96	
	4	157,19	16	255,99	
	5	178,12	$S_t = 256 (1 - e^{-1,786t})$		
	10	232,31	$0,015$	1	213,09
	15	248,79		2	248,81
	20	253,81		3	254,79
40	255,98	4		255,80	
$S_t = 256 (1 - e^{-0,474t})$				5	255,97
$4 \cdot 10^{-8}$	1	96,64		6	255,99
	3	194,24			

Таблица 42. Значения  $S_t$  при  $B = 8,5$  м;  $H = 2$  м;  
 $h = 1,5$  м;  $P = 0,375$  кг/см<sup>2</sup>

$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$	$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$
$S_t = 60 (1 - e^{-0,589t})$			$S_t = 60 (1 - e^{-2,94t})$		
$0,8 \cdot 10^{-8}$	1	26,71	$4 \cdot 10^{-8}$	0,25	31,23
	2	41,53		0,5	40,94
	3	49,75		1	56,83
	4	54,31		2	59,83
	5	56,84		3	59,99
	6	58,25	$S_t = 60 (1 - e^{-3,686t})$		
	7	59,03	$5 \cdot 10^{-8}$	0,25	36,11
	8	59,46		0,5	50,50
	9	59,70		1	58,49
	10	59,83		2	59,96
15	59,98	$S_t = 60 (1 - e^{-11,061t})$			
16	59,99	$0,015$	0,083	36,04	
$S_t = 60 (1 - e^{-1,474t})$			0,166	50,43	
$2 \cdot 10^{-8}$	1		46,26	0,25	56,22
	2		56,85	0,5	59,76
	3		59,29	0,83	59,99
	4		59,83		
	5	59,96			
	6	59,99			

Таблица 43. Значения  $S_t$  при  $B = 9,5$  м;  $H = 4$  м;  
 $h = 2$  м;  $P = 0,440$  кг/см<sup>2</sup>

$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$	$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$
I	2	3	I	2	3
$S_t = 120 (1 - e^{-0,264t})$			$0,8 \cdot 10^{-8}$	7	101,09
$0,8 \cdot 10^{-8}$	1	27,84		10	111,44
	3	65,65		15	117,71
	5	87,94		20	119,39
				30	119,96

Продолжение

I	2	3	I	2	3
$S_t = 120 (1 - e^{-0,661t})$			$S_t = 120 (1 - e^{-1,652t})$		
$2 \cdot 10^{-3}$	I	58,04	$5 \cdot 10^{-3}$	0,5	67,46
	3	103,48		I	96,99
	5	115,59		2	115,59
	7	118,82		3	119,15
	10	119,84		4	119,84
	12	119,96		5	119,97
	15	119,99		6	119,99
$S_t = 120 (1 - e^{-1,317t})$			$S_t = 120 (1 - e^{-4,957t})$		
$4 \cdot 10^{-3}$	0,5	57,85	0,15	0,083	40,44
	I	87,84		0,166	67,25
	2	111,38		0,25	85,34
	3	117,69		0,5	109,93
	4	119,38		0,83	118,04
	5	119,83		1,00	119,15
	6	119,95		1,50	119,93
	7	119,99		2,0	119,99

Таблица 44. Значения  $S_t$  при  $V = 10,5$  м;  $H = 6$  м;  
 $h = 2,5$  м;  $P = 0,520$  кг/см<sup>2</sup>

K, см/с	t, год	$S_t$ , см	K, см/с	t, год	$S_t$ , см
$S_t = 192 (1 - e^{-0,086t})$			$0,8 \cdot 10^{-3}$	50	189,39
$0,8 \cdot 10^{-3}$	I	15,82		80	191,80
	3	43,66		100	191,96
	5	67,10	$S_t = 192 (1 - e^{-0,217t})$		
	6	86,84	$2 \cdot 10^{-3}$	I	37,45
	10	110,75		3	91,87
	15	139,15		5	127,12
	20	157,62		7	149,96
30	177,45	10		170,08	

Продолжение

I	2	3	I	2	3
$2 \cdot 10^{-3}$	15	184,59	$S_t = 192 (1 - e^{-0,543t})$		
	20	189,50	$5 \cdot 10^{-3}$	1	80,45
	30	191,71		3	89,64
	40	191,99		5	179,29
		7		187,71	
$S_t = 192 (1 - e^{-0,433t})$			10	191,25	
$4 \cdot 10^{-3}$	1	67,48	15	191,94	
	3	139,62	$S_t = 192 (1 - e^{-1,629t})$		
	5	169,97	0,5	106,93	
	7	182,73	1	154,34	
	10	189,47	2	184,61	
	15	191,71	3	190,55	
	20	191,97	4	191,71	
			5	191,94	
			6	191,99	
			0,015		

Таблица 45. Значения  $S_t$  при  $B = 10,5$  м;  $H = 8$  м;  
 $h = 2,5$  м;  $P = 0,520$  кг/см<sup>2</sup>

K, см/с	t, год	$S_t$ , см	K, см/с	t, год	$S_t$ , см
I	2	3	I	2	3
$S_t = 256(1 - e^{-0,054t})$			$S_t = 256(1 - e^{-0,135t})$		
$0,8 \cdot 10^{-3}$	1	13,45	$2 \cdot 10^{-3}$	1	32,33
	3	38,29		2	60,57
	5	60,57		3	85,25
	10	106,82		4	106,82
	15	142,11		5	125,65
	20	169,06		6	142,11
	30	205,34		7	156,50
	50	238,79		10	189,63
	70	250,16		15	222,21
	100	254,84		20	238,79
	150	255,92		50	255,70
			70	255,98	

Продолжение

I	2	3	I	2	3	
$S_t = 256 (1 - e^{-0,27t})$				6	222,51	
$4 \cdot 10^{-8}$	0,5	32,33	$5 \cdot 10^{-8}$	7	232,14	
	1	60,57		8	239,00	
	2	106,82		9	243,89	
	3	142,11		10	247,37	
	5	189,63		15	254,41	
	7	217,32		20	255,71	
	10	238,79		25	255,95	
	15	251,54		$S_t = 256 (1 - e^{-1,018t})$		
	20	254,84			0,5	102,11
	30	255,92			1	163,50
$S_t = 256 (1 - e^{-0,339t})$				2	222,58	
$5 \cdot 10^{-8}$	0,5	39,80		3	243,92	
	1	73,60		4	251,64	
	2	126,05	$0,015$	5	254,42	
	3	163,41		6	255,43	
	4	190,03		7	255,79	
	5	208,99		8	255,92	
		9		255,97		

Таблица 46. Значения  $S_t$  при  $B = 8$  м;  $H = 2$  м;  
 $h = 1,5$  м;  $P = 0,375$  кг/см<sup>2</sup>

K, см/с	t, год	$S_t$ , см	K, см/с	t, год	$S_t$ , см
I	2	3	I	2	3
$S_t = 60 (1 - e^{-0,657t})$				7	59,40
$0,8 \cdot 10^{-8}$	1	28,90	$0,8 \cdot 10^{-8}$	8	59,69
	2	43,87		9	59,84
	3	51,64		10	59,91
	4	55,67		12	59,98
	5	57,75		15	59,99
	6	58,83			



Продолжение

I	2	3	I	3	3
$S_t = 60 (1 - e^{-1,643t})$			$S_t = 60 \text{ э} (1 - e^{-4,108t})$		
$2 \cdot 10^{-8}$	0,5	33,60	$5 \cdot 10^{-8}$	0,25	38,51
	1	48,40		0,5	52,31
	2	57,75		0,83	58,01
	3	59,56		1,0	59,01
	4	59,92		1,5	59,87
	5	59,98		2,0	59,99
$S_t = 60 (1 - e^{-3,276t})$			$S_t = 60 (1 - e^{-12,324t})$		
$4 \cdot 10^{-8}$	0,25	33,55	0,015	0,083	38,41
	0,5	48,34		0,166	52,24
	0,83	56,04		0,25	57,24
	1,0	57,73		0,5	59,87
	1,5	59,56		0,83	59,99
	2,0	59,91			
	2,5	59,98			

Таблица 47. Значение  $S_t$  при  $B = 9 \text{ м}$ ;  $H = 4 \text{ м}$ ;  
 $h = 2 \text{ м}$ ;  $P = 0,440 \text{ кг/см}^2$

K, см/с	t, год	$S_t$ , см	K, см/с	t, год	$S_t$ , см
I	2	3	I	2	3
$S_t = 120 (1 - e^{-0,28t})$			$S_t = 120 (1 - e^{-0,7t})$		
$0,8 \cdot 10^{-8}$	1	29,31	$2 \cdot 10^{-8}$	1	60,41
	3	68,19		2	90,41
	5	90,41		3	105,30
	7	103,10		4	112,70
	10	112,70		5	116,38
	12	115,83		6	118,20
	15	118,20		7	119,11
	20	119,56		8	119,56
	25	119,89		9	119,78
	30	119,97		10	119,89
	35	119,99		14	119,99

Продолжение

I	2	3	I	2	3	
$S_t = 120 (I - e^{-1,396t})$			$5 \cdot 10^{-8}$	2	116,38	
$4 \cdot 10^{-8}$	0,5	60,29		3	119,25	
	1	90,20		4	119,89	
	2	112,64		5	119,98	
	3	118,18		$S_t = 120 (I - e^{-5,253t})$		
	4	119,55		0,015	0,083	42,25
	5	119,89			0,116	69,78
	6	119,97	0,25		87,72	
7	119,99	0,5	111,31			
$S_t = 120 (I - e^{-1,751t})$			0,83		118,46	
$5 \cdot 10^{-8}$	0,5	69,98	1,0		119,37	
	1	99,17	1,5	119,95		
			2,0	119,99		

Таблица 48. Значения  $S_t$  при  $B = 10$  м;  $H = 6$  м;  
 $h = 2,5$  м;  $P = 0,520$  кг/см<sup>2</sup>

K, см/с	t, год	$S_t$ , см	K, см/с	t, год	$S_t$ , см
I	2	3	I	2	3
$S_t = 192 (I - e^{-0,098t})$			$S_t = 192 (I - e^{-0,245t})$		
$0,8 \cdot 10^{-3}$	1	17,92	$2 \cdot 10^{-3}$	1	41,72
	3	48,91		3	99,93
	5	74,37		5	135,60
	7	95,31		7	157,45
	10	119,94		10	175,43
	15	147,85		12	181,85
	20	164,95		15	187,13
	40	188,19		20	190,57
	60	191,46		25	191,58
	80	191,92		30	191,88
	100	191,99		40	191,99

Продолжение

I	2	3	I	2	3	
$S_t = 192 (1 - e^{-0,488t})$			$5 \cdot 10^{-8}$	6	187,15	
$4 \cdot 10^{-8}$	I	74,14		7	189,37	
	3	147,59		8	190,57	
	5	175,26		9	191,22	
	7	185,69		10	191,58	
	10	190,54		12	191,88	
	12	191,45		15	191,99	
	15	191,87		$S_t = 192 (1 - e^{-1,839t})$		
	20	191,99				
$S_t = 122 (1 - e^{-0,613t})$					0,5	115,41
$5 \cdot 10^{-8}$	I	87,99	I	161,47		
	2	129,73	2	187,15		
	3	161,47	3	191,23		
	4	175,46	4	191,88		
	5	183,04	5	191,99		
			0,015			

Таблица 49. Значения  $S_t$  при  $B = 10$  м;  $H = 8$  м;  
 $h = 2,5$  м;  $P = 0,520$  кг/см<sup>2</sup>

$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$	$K, \text{ см/с}$	$t, \text{ год}$	$S_t, \text{ см}$
I	2	3	I	2	3
$S_t = 256 (1 - e^{-0,051t})$			$S_t = 256 (1 - e^{-0,129t})$		
$0,8 \cdot 10^{-8}$	I	12,73	$2 \cdot 10^{-8}$	I	30,98
	3	36,32		2	58,21
	5	57,62		3	82,15
	10	102,27		5	121,69
	15	136,87		10	185,53
	20	163,69		15	219,03
	30	202,20		20	236,60
	50	236,01		30	250,66
	70	248,79		50	255,50
	100	254,44		70	255,99
	150	255,88			
	200	255,99			

Продолжение

I	2	3	I	2	3	
$S_t = 256 (1 - e^{-0,258t})$			$5 \cdot 10^{-8}$	6	219,36	
$4 \cdot 10^{-8}$	1	58,21		7	229,50	
	2	103,19		8	236,83	
	3	137,94		9	242,14	
	4	164,79		10	245,97	
	5	185,53		15	254,01	
	7	213,94		20	255,61	
	10	236,60		30	255,99	
	12	244,42		$S_t = 256 (1 - e^{-0,972t})$		
	15	250,66		0,015	1	159,15
	20	254,53	2		219,36	
30	255,89	3	242,14			
35	255,99	4	250,71			
$S_t = 256 (1 - e^{-0,324t})$			5		254,02	
$5 \cdot 10^{-8}$	1	70,85	6		254,95	
	2	122,09	7		255,72	
	3	159,15	8		255,89	
	4	185,95	9		255,96	
	5	205,34	10		255,99	

Приведенный прогноз осадки во времени позволяет более рационально подойти к выбору конструкции, назначению технологии возведения земляного полотна и установлению сроков устройства покрытия.

### 3. Определение скорости осадки с помощью номограммы

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что чем хуже условия водоотдачи (чем меньше  $K_{\phi}$ ), тем медленнее происходит осадка. Период консолидации основания насыпей может длиться очень долго, причем настолько долго, что сооружение за то время, на которое оно рассчитано, так и не достигнет расчетной максимальной остаточной осадки. Характеристика сжимаемости торфа во времени часто является более важной, чем полная  $S_{max}$ , так как дорога будет эксплуатироваться несколько десятков лет, а полная осадка часто требует ста лет и более.

Чтобы иметь прогноз осадки во времени для торфяных оснований с различными коэффициентами фильтрации, нами разработана номограмма для определения скорости осадки, в основу которой положена формула (50).

Для облегчения пользования номограммой составлена табл. 50, в которой приводятся габаритные размеры насыпей в соответствии с рисунком на номограмме и численные значения элементов номограммы.

Таблица 50. Численные значения элементов номограммы

B	$l_0$	h	P кг/см <sup>2</sup>	$\frac{b_0}{l_0}$	$\frac{V_0}{V_1}$	$l_0$	$\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{b_i}$
10	2	1,5	0,375	6,5	5	3	58,33
	4	2,0	0,440	3,5	1	4	58,15
	6			3,75	5	4	79,53
	8	2,5	0,520	1,87	5	4	91,19
8	2	1,5	0,375	5,5	2	3	81,93
	4	2,0	0,440	3,0	1	4	161,29
	6	2,5	0,520	2,17	2	2	94,75
	8			1,87	4	2	105,48
5,5	2	1,5	0,375	4,25	1	1	76,06
	4	2,0	0,440	2,37	2	2	131,45
	6	2,5	0,520	1,75	2	4	108,10
	8	2,5	0,520	1,31	3	4	110,60

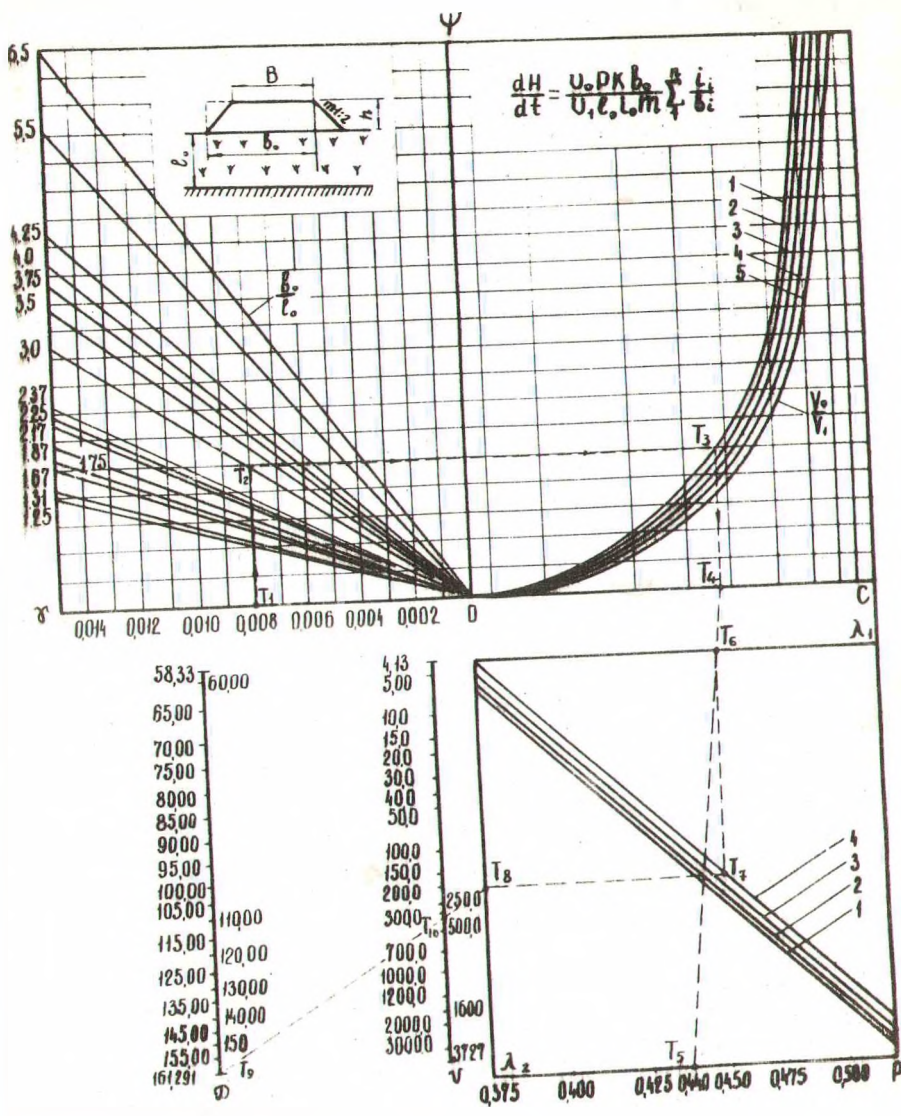


Рис. 23 Номограмма для определения скорости осадки основания настиля

Продолжение

I	2	3	4	5	6	7	8
5	2	1,5	0,375	4,00	2	1	116,51
	4	2,0	0,440	2,25	2	2	154,87
	6	2,5	0,520	1,67	3	2	91,97
	8			1,25	2	2	93,66

На шкале К (рис.23) выбираем интересующий нас коэффициент фильтрации торфяного основания (т.1) и восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с наклонной линией  $\frac{Q_0}{L_0}$  (т.2), значения которой выбираем из табл. 50. Из т.2 ведем горизонтальную прямую до кривой  $\frac{V_0}{V_1}$  (т.3), откуда опускаем перпендикуляр на шкалу С (т.4). На шкале Р (т.5) откладываем известное значение удельного давления насыпи. Соединим т.4 и т.5. Проведенная линия пересекла шкалу  $\mathcal{K}_1$ .

С места пересечения (т.6) опускаем вертикальную прямую до соответствующего значения  $l_0$  (т.7). Из т.7 проводим горизонтальную линию до пересечения со шкалой  $\mathcal{K}_2$  (т.8). По табл. 50 находим значение  $\sum \frac{l_i}{T_i}$  на шкале  $\mathcal{D}$  (т.9) для заданной насыпи. Соединяем т.8 и т.9. (Эта прямая пересекает шкалу V в т.10, численное значение которой и даст искомую величину. Полученную скорость осадки V подставляем в формулу (51) и определяем осадку во времени для торфяного основания с заданным удельным давлением и выбранным коэффициентом фильтрации.

## Глава 5. КОНСТРУКЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ТИПОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

### 1. Технологические и конструктивные мероприятия по ускорению уплотнения грунта основания насыпи

В тех случаях, когда устойчивость основания достаточна, но, согласно расчетам, следует ожидать слишком длительной осадки, не отвечающей срокам строительства, необходимо предусматривать мероприятия по ускорению осадки, особенно при постройке дорог высоких категорий. Чем выше категория дороги и чем жестче покрытие, тем труднее исправление появляющихся деформаций и разрушений. Поэтому дорожную одежду с усовершенствованным покрытием следует устраивать лишь после того, как осадка насыпи на болоте достигнет 0,90-0,95 полной осадки. Это достигается различными методами: временной пригрузки, предварительной консолидации, устройства оснований с вертикальными дренами и дренажными прорезями, частичного удаления слабого слоя.

Метод временной пригрузки заключается в том, что временно возводят насыпи большей высоты, чем требуется по проекту, с целью достижения проектной осадки в заданный промежуток времени. Когда проектная величина осадки достигнута, излишек грунта с насыпи убирают и используют на соседнем участке.

Метод предварительной консолидации применяется при возведении насыпей требуемой высоты на основаниях II типа и на основаниях I типа при использовании способа временной пригрузки в тех случаях, когда устойчивость основания в его природном состоянии недостаточна для восприятия нагрузки от насыпи увеличенной высоты.

Метод предварительной консолидации заключается в назначении определенного режима возведения насыпи с таким расчетом, чтобы фактически действующая нагрузка была больше расчетной в связи с неполным проявлением эффекта взвешивания.

В тех случаях, когда методами технологического порядка нельзя обеспечить завершение осадки проектируемой насыпи,



следует прибегать к конструктивным мероприятиям, относящимся непосредственно к самому основанию.

Метод частичного удаления слабого грунта предназначен, главным образом, для ускорения первичной (фильтрационной) осадки. Этот метод можно применять также для некоторого повышения несущей способности основания за счет удаления наиболее слабого слоя.

При мощности слабого слоя менее 4 м вместо вертикальных дрен, которые на лесовозных дорогах устраивать нецелесообразно, могут быть применены дренажные прорезы (рис.24), не требующие специального оборудования для их сооружения. Дренажные прорезы можно устраивать только в грунтах, способных удерживать вертикальные стенки в течение времени, необходимого для заполнения прорезы песком.

Расстояние между дренажными прорезями ориентировочно назначается в пределах 1,8 - 2,4 м и проверяется расчетом [26].

Песок, используемый для заполнения прорезей, должен иметь коэффициент фильтрации не менее 3 м/сутки.

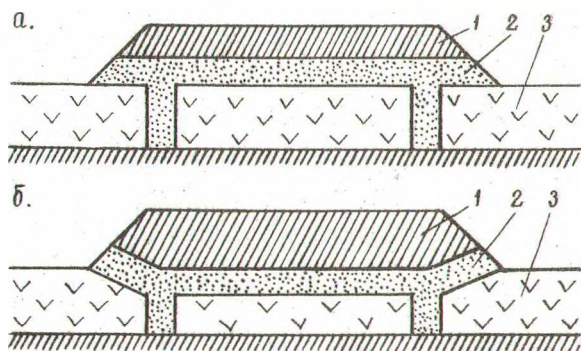


Рис. 24 Конструктивные мероприятия для ускорения осадки насыпи на болоте (устройство прорезей, заполненных песком):

а - до осадки; б - после осадки;

1 - грунт; 2 - песок; 3 - торф.

## 2. Типы дорожных конструкций на переходах через болото

В последнее время различными авторами предложен ряд новых конструкций земляного полотна на болотах. Сюда входят конструкции насыпей из дренирующих и недренирующих грунтов на естественном и торфяном основании и основаниях, упрочненных глубокими дренажными прорезями и т.д.

В табл. 5I систематизированы [16] по степени жесткости типы дорожных конструкций и их основания. Таблица охватывает все известные решения, в том числе редко применяемые.

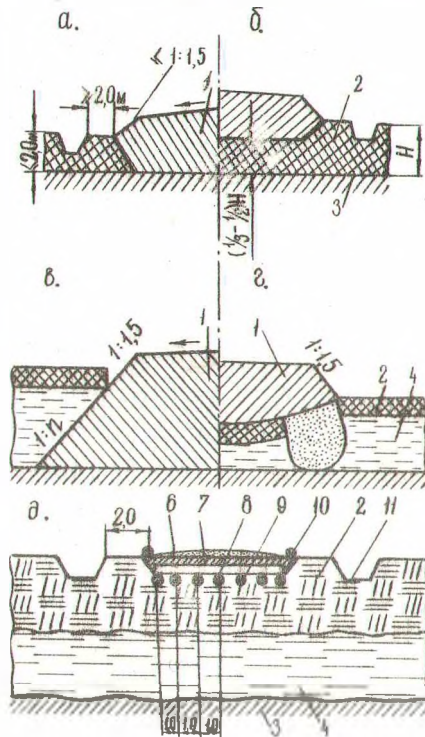


Рис. 25 Поперечные профили дорог на болоте:

а - на плотных торфах с полным выторфовыванием; б - на плотных торфах с частичным выторфовыванием; в - на болотах, заполненных сарепелем под верхней плотной коркой (сплавинной); г - устройство песчаных призм для выжимания жидкого торфа; д - дорожное полотно на плаву с жердевым настилом;  
 I - тело насыпи; 2 - плотный торф; 3 - минеральное дно;  
 4 - жидкий торф; 5 - песчаная призма; 6 - гравий; 7 - мох; 8 - жерди 12-16 см; 9 - лежни 16-18 см; 10 - прижимные брусья 18-20 см; 11 - канава.

Таблица 51. Систематизация конструктивных решений на переходах через болота (по И.Е.Евгеньеву)

Типы оснований	Типы жесткости дорожной конструкции		
	А - жесткая	Б - ограниченно-деформируемая	В - гибкая
I жесткое	Эстакада	Насыпь, возведенная на дне болота	Насыпь на сваях
II уплотненное	Плита на висячих опорах	Массивная насыпь на консолидированном основании	Насыпь на уплотненном (укрепленном, вечномерзлом и т.п.) основании
III мягкое	Жесткая конструкция из легких материалов	Армированная насыпь, насыпь на сланях	Настилы, гати

Наибольшее распространение при строительстве дорог общего пользования получили конструкции типов IA, IB, а для временных дорог IIB.

Строительство лесовозных дорог с помощью сланей хоть и является дорогим, но по-прежнему остается наиболее распространенным способом.

По виду применяемого материала древесные слани можно разделить на два типа: настилы, представляющие бревенчатый сплошной или разреженный накат, скрепленный в различной комбинации с продольными прогонами; выстилка из отходов лесоразработки - мелколесья, сучьев, хвороста, связанного в фашины.

На болотах, заполненных торфами устойчивой консистенции, устраивают деревянные настилы в целях создания удобной для проезда поверхности дороги, распределяющей давление на торф от проезжающих транспортных средств таким образом, чтобы напряжения в нем не превышали допустимых, т.е. чтобы в торфе не накапливались необратимые деформации. В этих случаях настилы работают как конструкции на упругом основании, и их расчет основан на закономерностях теории упругости.

Выстилка только из хвороста и порубочных остатков не обеспечивает высокой жесткости, характерной для бревенчатых

сланей, но также дает эффект повышения устойчивости и снижения осадки насыпи. Жесткость конструкции повышается, если ветви (ива и другие лиственные породы), очищенные от листьев, связываются проволочными скрутками в фашины. Фашины толщиной 15-20 см укладывают в два ряда по продольным лежням из тонкого леса (диаметром 14 - 16 см). Фашины укладывают перекрещивающимися рядами под углом  $46^{\circ}$  к оси дороги. Каждый ряд покрывают слоем торфа или мха толщиной 5-8 см. По краям проезжей части фашины укрепляют прижимными бревнами, связываемыми проволокой с крайними лежнями. Поверх слоя фашин, закрытого мхом или торфом, укладывают слой гравия толщиной 20-25 см.

По сторонам гати, на расстоянии 3-4 м от нее, устраивают боковые каналы для отвода воды и осушения дорожной полосы.

Жесткость древесного настила в десятки раз превышает жесткость грунта насыпи.

В табл. 52. показана эквивалентная толщина сланей различной конструкции, приведенная к толщине насыпи.

Таблица 52. Расчетные значения толщины сланей (по И.И.Канатову)

Вид сланей	Средний диаметр лесоматериала, см	Расчетная высота конструкции, м	Коэффициент сплошности	Эквивалентная толщина насыпи, м
Хворостяная выстилка	2 - 4	0,25	0,50	0,50
Фашинный тюфяк	1 - 2	0,30	0,60	0,50
Жердевой много-рядный настил	5 - 12	0,20	0,75	0,85
Слани бревенчатые одnorядные	15	0,20	0,83	1,25
То же	20	0,25	0,82	1,60
То же	25	0,30	0,81	2,00
Слани бревенчатые двухрядные	15	0,31	0,80	2,40
То же	20	0,40	0,79	3,00
То же	30	0,60	0,75	4,50

В Гипролестрансе была предложена конструкция насыпи, у которой надземная часть может быть отсыпана из дренирующих или слабо дренирующих водостойких грунтов, а погруженная часть (фундамент насыпи) — из дробленных древесных отходов нетоварной древесины, остающейся на просеках, или древесной растительности болот.

М.А. Шапошников [42] предложил конструкцию насыпи с надземной частью из водостойких недренирующих грунтов, отсыпанных на хворостяную подушку толщиной 20–25 см, уложенную на поверхность торфяного основания, дренированного прорезями траншейного или щелевого типа, которые заполнены дробленой древесиной или опилками. Тип прорезей определяется имеющейся землеройной техникой и условиями ее проходимости по болоту. Количество траншей принимается не менее трех для двухполосных дорог и одной — для однополосных. Работа выполняется зимой, когда торф частично промерз и возможен проход экскаватора.

Для повышения степени устойчивости основания автодорожных насыпей в соответствующих случаях рекомендуется использовать для их возведения местные легкие материалы, например, шлаки, при наличии их в районе строительства.

Для этой же цели могут быть применены древесные опилки, а также смесь песка с торфом.

Снижение веса земляного полотна может быть также достигнуто устройством ячеистой конструкции из гравийного материала с добавкой цемента. Подобные конструкции должны проектироваться индивидуально с соответствующим технико-экономическим обоснованием.

### 3. Некоторые рекомендации по выбору конструкции земляного полотна

Возможность применения какого-либо из описанных типов конструкции земляного полотна определяется такими факторами, как мощность болотной залежи, трудоемкость возведения насыпи, продолжительность строительного периода.

Продолжительность строительства определяется не только трудоемкостью работ, но и продолжительностью технологичес-

ких перерывов для консолидации слабого грунта в основании.

На рис. 26 и в табл. 53 и 54 приведен анализ результатов прогноза осадки плавающей насыпи во времени от различных факторов.

Таблица 53. Осадка залежи в % от полной осадки через 1 год после возведения насыпи. Удельное давление насыпи  $0,520 \text{ кг/см}^2$ , коэффициент фильтрации торфа -  $0,015 \text{ см/с}$

Ширина земляного полотна, м	Глубина залежи торфа, м	
	6	8
	Осадка	
5,0	84,1	62,2
5,5	80,4	63,9
8,0	91,0	83,2
10,0	87,1	73,8

Таблица 54. Осадка залежи в % от полной осадки через 6 месяцев после возведения насыпи

Коэффициент фильтрации торфа, см/с	Глубина залежи и удельное давление	
	2 м; $0,375 \text{ кг/см}^2$	4 м; $0,440 \text{ кг/см}^2$
	Осадка	
$0,8 \cdot 10^{-3}$	23,3	10,0
$2 \cdot 10^{-3}$	45,8	42,5
$4 \cdot 10^{-3}$	71,8	64,6
$5 \cdot 10^{-3}$	79,5	72,8
0,015	99,1	98,0

Как видно из табл. 53, ширина земляного полотна оказывает некоторое влияние на скорость уплотнения залежи. Земляное полотно шириной 8 м, с этой точки зрения, оказалось наиболее оптимальным.

Существенней всего на длительность консолидации влияет коэффициент фильтрации (табл. 54). На торфяном основании, имеющем коэффициент фильтрации  $0,015 \text{ см/с}$ , процесс консолидации

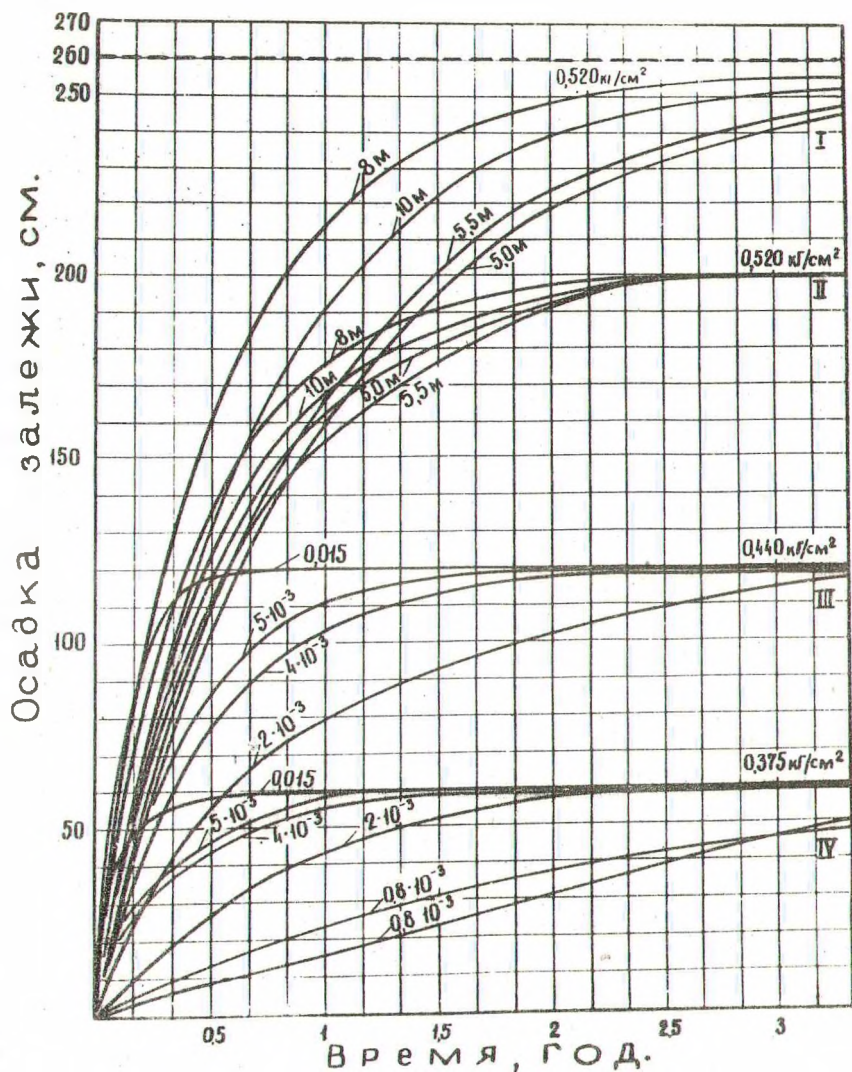


Рис. 26 Зависимость длительности осадки:

I, II - от ширины земляного полотна и глубины торфяной залежи;

III, IV - от коэффициента фильтрации торфа и величины удельного давления насыпи. Ширина земляного полотна, коэффициент фильтрации (см/с) и удельное давление показаны на кривых

завершается через полгода после возведения насыпи, тогда как на залежи с коэффициентом фильтрации  $0,8 \cdot 10^{-8}$  см/с процесс консолидации только начинается (10%).

Приведенный анализ прогноза процесса консолидации основания насыпи позволяет заранее устанавливать технологические перерывы, необходимые при использовании различных вариантов плавающих насыпей под одежды с покрытиями усовершенствованного и переходного типов.

Для дорог низких категорий сравнение вариантов целесообразно проводить по общей стоимости конструкции. Стоимость в этом случае определяется в основном трудоемкостью строительства.

Примерные экономические показатели некоторых типов дорожных конструкций для переходов через болота в условиях Севера Европейской части СССР и районов Московской области приведены в табл. 55 и на рис. 27.

Таблица 55. Экономические показатели для некоторых типов дорожных конструкций

Тип конструкции	Затраты на I км дороги	
	Стоимость, тыс.руб.	Трудоемкость (без транспортных работ), чел-дни
Гравийное покрытие на песчаном слое толщиной 25 см	8 - 13	200 - 230
Однорядное бревенчатые слани с грунтовым покрытием толщиной 15 см	12 - 18	450 - 600
Однорядные бревенчатые слани с колеяным деревянным покрытием	10 - 16	400 - 500
Колеяные дороги из решетчатых железобетонных плит на слое грунта 15-25 см	18 - 22	110 - 130

После сравнения по стоимости конкурирующие варианты рекомендуется оценивать по трудоемкости строительства.



Дальнейшие расчеты конструктивных элементов могут показать, что принятый вариант ненадежен, поэтому результаты технико-экономического сравнения надо оценивать как предварительные.

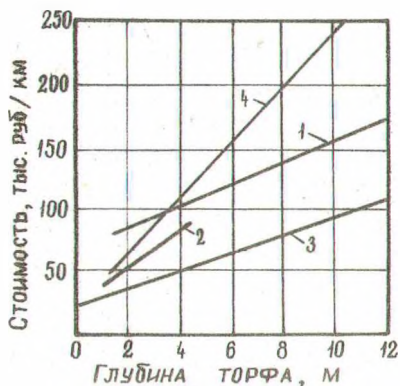


Рис. 27 Зависимость стоимости различных типов земляного полотна от глубины болота:

- 1 - насыпь с временной дополнительной пригрузкой высотой 1,5 м;
- 2 - земляное полотно с дренажными прорезями;
- 3 - плавающая насыпь;
- 4 - частичное выторфовывание (2/3 от глубины болота).

В настоящее время нет общей методики по определению экономической эффективности различных конструкций из-за отсутствия данных о расходах по эксплуатации.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. АМАРЯН Л.С. Вопросы механики обезвоживания торфа методом прессования. Труды КПИ, вып. 15, 1968.
2. АМАРЯН Л.С. Определение влажности торфа путем механического обезвоживания в тонких слоях. Материалы к первой Всесоюзной конференции по строительству на торфяных грунтах. Калинин, 1972.
3. АМАРЯН Л.С. Полевые приборы для определения прочности и плотности слабых грунтов. М., 1966.
4. АМАРЯН Л.С. Слабые грунты и основные положения методики и аппаратуры инженерно-геологических исследований. Материалы к первой Всесоюзной конференции по строительству на торфяных грунтах. Калинин, 1972.
5. АМАРЯН Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. Л., 1969.
6. БАБКОВ В.Ф. Обзор экспериментальных работ по измерению напряжений в грунте. Труды ДорНИИ, вып. 1, М., 1938.
7. БЕРЕЗАНЦЕВ В.Г. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты, М., 1961.
8. БРУДАСТОВ А.Д. Осушение минеральных и болотных земель. М., 1955.
9. ВИНОКУРОВ Ф.П., ТЕТЕРКИН А.Е., ПИТЕРМАН М.А. Строительные свойства торфяных грунтов Минск, 1962.
10. ГЕРСЕВАНОВ Н.М., ПОЛЬШИН Д.Е. Теоретические основы механики грунтов и их практическое применение. М., 1948.
11. ДРОЗД П.А. Оценка напряженного состояния основания земляных плотин на болотах. Материалы к первой Всесоюзной конференции по строительству на торфяных грунтах. Калинин, 1972.
12. ДРОЗД П.А. Сельскохозяйственные дороги на болотах. Минск, 1966.
13. ДРУЖИНИН Н.И. Метод электродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации, 1956.
14. ДУБАХ А.Д. Грунтовая вода в торфяном болоте. ЛГУ, серия геогр. вып. 2, № 50, 1940.
15. ЕВГЕНЬЕВ И.Е. Строительство автомобильных дорог через болота. М., 1968.
16. ЕВГЕНЬЕВ И.Е. Конструктивно-технологические решения земляного полотна на слабых грунтах. Труды СоюзДорНИИ. Выпуск 65, 1973.

17. КАЗАРНОВСКИЙ В.Д. К вопросу о дорожно-строительной классификации торфяных грунтов. Материалы к первой Всесоюзной конференции по строительству на торфяных грунтах. Калинин, 1972.
18. КАЗАРНОВСКИЙ В.Д. Оценка устойчивости насыпей на слабых грунтах "Автомобильные дороги", № 1, 1966.
19. Канал Москва-Волга. Торф в строительстве, 1940.
20. КИРПИЧЕВ М.В. Теория подбоя. М., 1953.
21. КОЖАНОВ К.Я. Регулирование влажности торфяно-болотных почв. Труды института мелиорации водного и болотного хозяйства АН БССР, т. III, Минск, 1953.
22. КОРОЛЕВ А.С., ЛЕВИТИН А.Т. Определение конечных деформаций торфяного основания от действия внешних нагрузок. Материалы к первой Всесоюзной конференции по строительству на торфяных грунтах. Калинин, 1973.
23. КОРЧУНОВ С.С. Исследование физико-механических свойств торфа. Тр. ВНИИТП, вып. XII, 1953.
24. ДУНДИН К.П. Определение коэффициента уплотнения торфа. Тр. института болотного хозяйства, т. I, 1938.
25. МАСЛОВ Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М., 1968.
26. Методические указания по проектированию земляного полотна на слабых грунтах. М., 1968.
27. ПЕЧКУРОВ А.Ф. Устойчивость русла регулированных рек. Минск, 1950.
28. ПЕЧКУРОВ А.Ф. Уплотнение торфа под нагрузкой. Тр. Ин-та мелиорации и водного хозяйства АН БССР, т. УП, 1956.
29. ПОКРОВСКИЙ Г.И., ФЕДОРОВ И.В. Моделирование осадок оснований. М., 1939.
30. РАЗОРЕНОВ В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М., 1958.
31. РУБИНШТЕЙН А.Я. Инженерно-геологические особенности сап-ропелевых отложений, М., 1971.
32. СОРОКИНА Г.В. Строительная классификация морских илов. М., 1965.
33. Справочник по торфу. ГЭИ, 1954.
34. Технические указания по проектированию автомобильных дорог лесозаготовительных предприятий, Л., 1964.

35. ТРИШИН Г.Г. Особенности расчета торфяных оснований при сооружении на них насыпей недренирующих грунтов. Материалы к первой Всесоюзной конференции по строительству на торфяных грунтах, Калинин, 1972.
36. ТКАЧЕНКО А.А. Торфяные грунты как основания инженерных сооружений. Материалы к первой Всесоюзной конференции по строительству на торфяных грунтах. Калинин, 1972.
37. ФАДЕНКОВ А.А. Влияние типа шины и давления воздуха в ней на напряженное состояние гравийной и грунтовой лесовозных дорог. Тр. ЦНИИМЭ, сб. 72, Химки, 1966.
38. ФАДЕНКОВ А.А. Напряжения и деформации в гравийной и грунтовой дорогах при проходе лесовозных автопоездов. Тр. ЦНИИМЭ, сб. 82, Химки, 1967.
39. ФЕДИН Н.К., КАТКЕВИЧЮС Л.А. Мелиорация избыточно увлажненных земель намывом грунта. "Гидротехника и мелиорация", № 5, 1965.
40. ФЛОРИН В.А. Основы механики грунтов, том I, М., 1959.
41. ЦЫТОВИЧ Н.А. Механика грунтов. М., 1963.
42. ШАПОШНИКОВ М.А. Транспортное освоение заболоченных лесов. М., 1971.
43. ШАПОШНИКОВ М.А. Задачи инженерно-строительного болото-ведения. Материалы к первой Всесоюзной конференции по строительству на торфяных грунтах. Калинин, 1972.
44. ШАПОШНИКОВ М.А. Обеспечение устойчивости насыпей на болотах. "Автомобильные дороги", № 6, 1966.
45. ШАПОШНИКОВ М.А. Расчет критической величины поперечного уклона дна торфяных массивов, загруженных насыпью. Тр. ЦНИИМЭ, сб. 72, Химки, 1966.
46. ШАПОШНИКОВ М.А. Определение расстояния канав от насыпи на болоте и заболоченных грунтах. "Лесная промышленность", № 9, 1966.
47. ШЕЛОПАЕВ Е.И., БЕЛЯУШ А.В. Основы дорожного грунтоведения и механики грунтов. Красноярск, 1970.

# О Г Л А В Л Е Н И Е

	С т р
Глава 1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФЯНЫХ ГРУНТОВ	5
1. Основные признаки слабых грунтов	5
2. Дорожно-строительная классификация торфяных грунтов	7
3. Физико-механические характеристики слабых грунтов	14
4. Методика лабораторных определений физико-механических показателей слабых грунтов	17
5. Полевые методы определения характеристик механических свойств грунтов	39
Глава 2. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ НА ТОРФЯНЫХ ОСНОВАНИЯХ	44
1. Основные требования к конструкции земляного полотна на слабых грунтах	44
2. Расчет осадки оснований	50
3. Устойчивость оснований	54
4. Определение типа основания в зависимости от устойчивости	56
Глава 3. НАПРЯЖЕНИЯ В ОСНОВАНИИ НАСЫПЕЙ	59
1. Применение принципа линейной деформируемости к болотным грунтам	59
2. Сущность метода электроанalogии	61
3. Исходные данные для моделирования	65
4. Оценка напряженного состояния основания насыпей методом электрогидродинамического моделирования	71
5. Графики для определения напряжений в основании земляного полотна	75
Глава 4. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ОСАДКИ ОСНОВАНИЙ НАСЫПЕЙ	89
1. Моделирование интенсивности осадки	89
2. Расчетные значения осадки во времени	92
3. Определение скорости осадки с помощью номограммы	108

Глава 5. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ТИПОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА	III
1. Технологические и конструктивные мероприя- тия по ускорению уплотнения грунта основа- ния насыпи	III
2. Типы дорожных конструкций на переходах через болото	III
3. Некоторые рекомендации по выбору конструк- ции земляного полотна	III
Литература	III

Отв. за выпуск Родионов А.М.

---

АТ ОI575. Сдано в набор 3.XII.73г. Подписано к печати  
13.XII.73г. Формат 60x84 1/16. Печ.л.8. Уч-изд.л.7. Тираж 500.  
Цена 44 коп. Отпечатано на ротапринтере Минского заочного  
политехникума, зак.1408. г.Минск, ул.Козлова,55.