

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

Архитектурно-строительный факультет  
Кафедра строительных материалов и конструкций

## **ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

по дисциплине

и для самостоятельной работы

для аспирантов по направлению подготовки

08.06.01 Техника и технологии строительства

(уровень подготовки кадров высшей квалификации)

Краснодар  
КубГАУ  
2019

*Составители:* Маций С.И., Рябухин А.К.

**Основания и фундаменты в сложных инженерно-геологических условиях** : метод. указания по дисциплине и для самостоятельной работы / сост. С. И. Маций, А. К. Рябухин – Краснодар : КубГАУ, 2019. – 58 с.

Метод. указания предназначен для аспирантов по направлению подготовки 08.06.01 - Техника и технология строительства

Рассмотрено и одобрено методической комиссией архитектурно-строительного факультета Кубанского государственного аграрного университета, протокол № 2 от 22.10.2019.

Председатель  
методической комиссии



А. М. Блягоз

© Маций С.И., Рябухин А.К.,  
составление, 2019

© ФГБОУ ВО «Кубанский  
государственный аграрный  
университет имени  
И. Т. Трубилина», 2019

# **ЛЕКЦИЯ 1**

## **ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СООРУЖЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Строительство автомобильных дорог в сейсмических районах на оползнеопасных территориях следует выполнять в соответствии с СП 14.13330.

При новом строительстве автомобильных дорог в сейсмических районах в условиях горного и предгорного рельефа на оползневых склонах положение трассы следует выбирать по результатам технико-экономического сравнения вариантов обхода этих участков в плане и в профиле и варианта инженерной защиты участка (возведения защитных сооружений). Как правило, следует отдавать предпочтение варианту трассы в обход оползнеопасных участков.

Влияние сейсмических явлений на развитие оползневых процессов определяется:

- приуроченностью оползней к зонам тектонических нарушений;

- силовым воздействием сейсмических сил на неустойчивые породы.

Кроме того, оползневые процессы могут быть усугублены тем, что сейсмическое воздействие вызывает пльвинные или тиксотропные процессы в породах предрасположенных к их развитию, а также вытекание отмеченных пород со склонов и откосов.

Развитие крупных оползней вблизи зон тектонических нарушений вызвано:

- широким развитием зон смятия и дробления в коренных породах;

- интенсивной циркуляцией подземных вод;

- активной сейсмической деятельностью.

Зоны дробления пород характеризуются повышенной трещиностойкостью и обводненностью, что является дополнительным фактором оползнеобразования.

Максимальный эффект от сейсмического воздействия наблюдается при условии совпадения по времени землетрясений силой 6 и более баллов с периодами за-

тяжных или ливневых дождей. При этом отмечается эффект запаздывания между временем проявления оползней и временем действия перечисленных факторов, иногда значительный.

Сейсмическое воздействие на оползневой склон носит кумулятивный характер и зависит от степени подготовки склона к смещению воздействием других факторов. Особенно сильно сказываются землетрясения на устойчивости склонов в строении которых присутствуют грунты, характеризующиеся резким снижением их прочности при вибрации.

Оползневые процессы, вызванные сейсмическими воздействиями, как правило, интенсивно развиваются в эпицентральных зонах землетрясений на участках распространения песчано-глинистых, выветрелых малоустойчивых пород; наибольшая активность проявляется в период максимальной увлажненности пород.

Расчеты устойчивости оползнеопасных склонов выполняются с целью определения необходимости инженерной защиты автомобильной дороги на основе:

- результатов выполненных и архивных инженерно-геодезических, инженерно-геологических и инженерно-гидрометеорологических изысканий для строительства;

- планировочных решений участка и вариантов прокладки трассы (при новом строительстве);

- результатов стационарных наблюдений за автомобильной дорогой и склоном (при реконструкции или капитальном ремонте).

Оценка влияния сейсмического воздействия на устойчивость оползневых участков автомобильных дорог может быть выполнена различными методами, в зависимости от уровня ответственности автомобильной дороги, сложности инженерно-геологических условий участка и наличия необходимых исходных данных.

Состав и объем работ, выполняемых в рамках инженерных изысканий для оценки сейсмического воздействия на устойчивость склонов должны соответствовать требованиям СП 47.13330 и государственных стандартов по инженерным изысканиям и исследованиям грун-

тов для строительства. При этом в сейсмических районах инженерно-геологические изыскания должны включать в себя сейсмическое микрорайонирование (СМР) участка.

Результаты стационарных наблюдений за автомобильной дорогой и склоном позволяют более достоверно оценить устойчивость оползневого массива и сократить материальные затраты на инженерную защиту участка. В рамках стационарных наблюдений следует фиксировать подвижки грунта и поведение грунтовых вод при землетрясениях (в т. ч. малой интенсивности).

В проектах строительства автомобильных дорог повышенного уровня ответственности с целью получения достоверной информации о работе конструктивных элементов и колебаниях грунтов при интенсивных землетрясениях, следует предусматривать установку станций наблюдения за динамическим поведением конструктивных элементов и прилегающих грунтов.

## **ЛЕКЦИЯ 2**

### ***РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ***

Расчеты устойчивости оползнеопасных склонов, расположенных в непосредственной близости от автомобильной дороги, должны, как правило, выполняться по первой группе предельных состояний. Если потеря устойчивости таких склонов (участков склона) не приводит автомобильную дорогу в состояние, непригодное к эксплуатации, то расчеты склонов следует вести по второй группе предельных состояний. То есть расчеты устойчивости оползнеопасных склонов в зависимости от степени влияния оползневых процессов на надежность и безопасность эксплуатации автомобильной дороги могут быть отнесены как к первой, так и ко второй группам предельных состояний:

- к первой: расчеты общей устойчивости системы «автомобильная дорога – склон» (рисунок 1,  $a \div b$ ); расчеты местной устойчивости – отдельных морфологических элементов оползневого склона, нарушение устой-

чивости которых приводит к прекращению эксплуатации дороги (рисунок 2,  $a \div б$ );

- ко второй: расчеты устойчивости склонов и их отдельных морфологических элементов, разрушение которых не приводит автомобильную дорогу в непригодное состояние (рисунок 2,  $в$ ).

Расчеты устойчивости оползнеопасных склонов автомобильных дорог, возводимых на территориях с расчетной сейсмичностью 7 и более баллов следует выполнять на основное и особое сочетание нагрузок.

Расчет устойчивости оползнеопасных склонов и их морфологических элементов на особое сочетание нагрузок (с учетом сейсмического воздействия) следует выполнять только по первой группе предельных состояний (рисунок 1,  $a \div в$ ; рисунок 2,  $a \div б$ ).

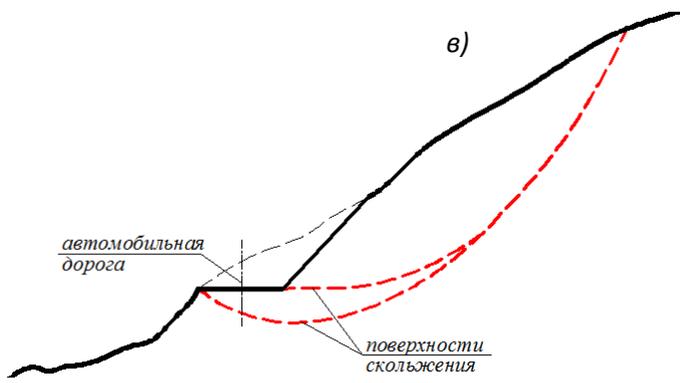
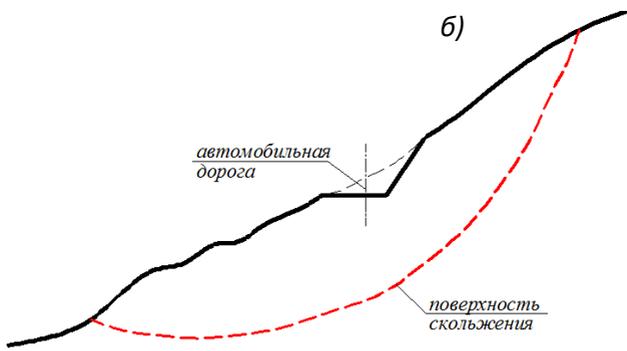
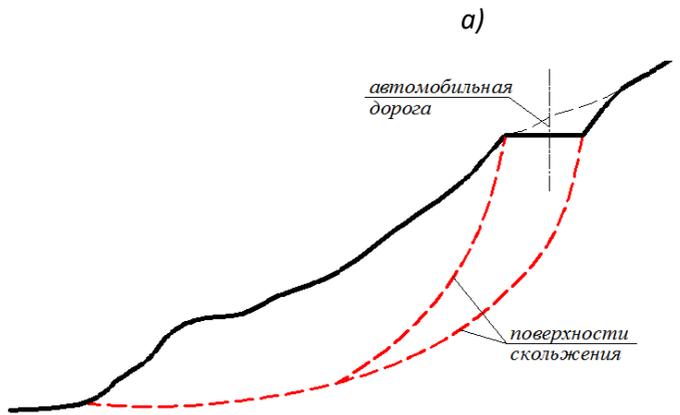


Рисунок 1 – Схемы взаимного расположения автомобильной дороги и оползнеопасного склона (общая устойчивость склона)

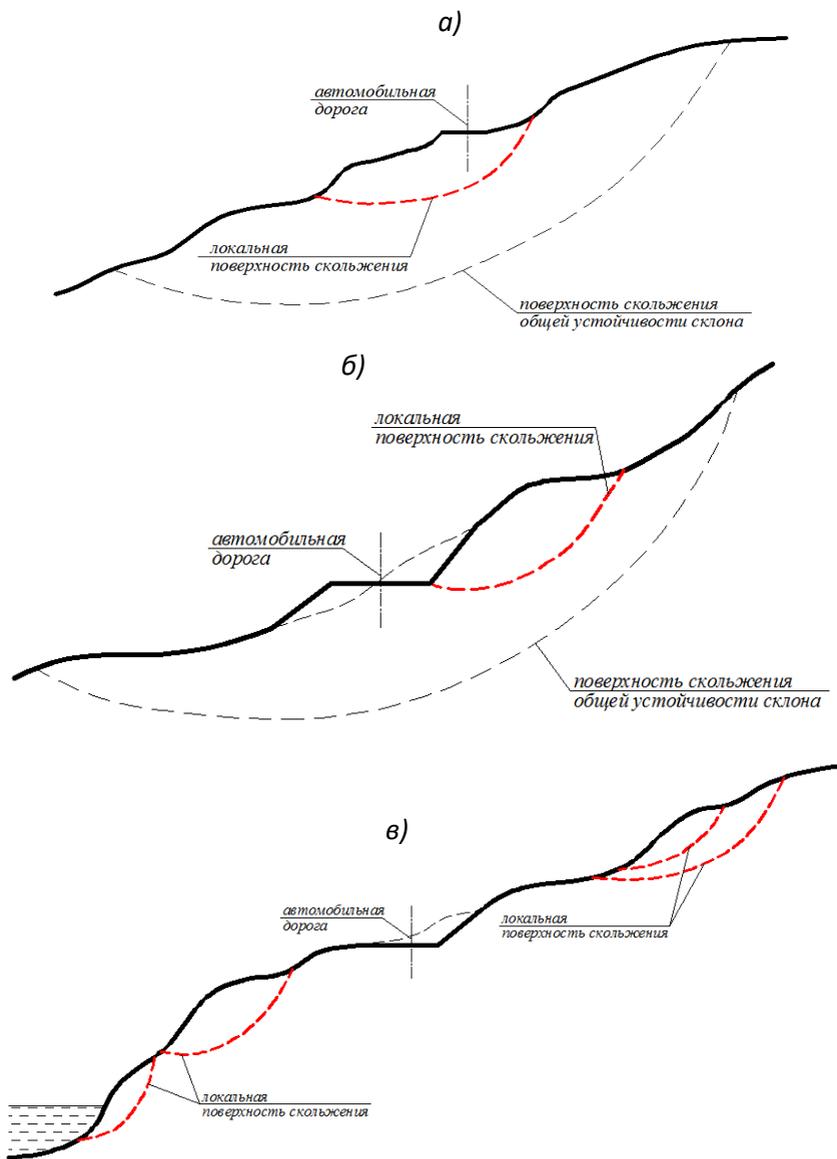


Рисунок 2 – Схемы взаимного расположения автомобильной дороги и оползнеопасного склона (местная устойчивость)

### ЛЕКЦИЯ 3

## **НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ**

### **Общие положения, сочетание нагрузок**

В особое сочетание нагрузок включают постоянные  $P_d$ , длительные  $P_l$ , кратковременные  $P_t$  и особую  $P_s$  нагрузки:

$$C_s = P_d + (P_{l1} + P_{l1} + \dots) + (P_{t1} + P_{t2} + \dots) + P_s, \quad (1)$$

где  $C_s$  – нагрузка для особого сочетания.

К постоянным  $P_d$  нагрузкам следует относить:

- вес дорожной одежды, земляного полотна и др. конструктивных элементов автомобильной дороги;
- вес несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений, располагаемых на склоне;
- вес грунтов;
- гидростатическое давление грунтовых вод.

К длительным  $P_l$  нагрузкам следует относить:

- воздействия, обусловленные деформациями основания, не сопровождающимися коренным изменением

структуры грунта, а также оттаиванием вечномерзлых грунтов;

- воздействия, обусловленные изменением влажности, усадкой и ползучестью грунтов;

- нагрузка от складированного материала, равномерно распределенная нагрузка на территории;

- от подвижного состава железных дорог СК.

К кратковременным нагрузкам  $P_t$  следует относить:

- нагрузки от людей;

- нагрузки от транспортных средств типа НК;

- климатические (снеговые, гололедные) нагрузки.

К особым  $P_s$  нагрузкам следует относить сейсмические воздействия.

Температурные климатические воздействия, ветровые нагрузки, динамические воздействия от оборудования и транспорта, тормозные усилия от движения техники при расчетах устойчивости на сейсмическое воздействие не учитываются.

Для каждой расчетной ситуации необходимо учитывать все возможные неблагоприятные расчетные сочетания нагрузок. Эти сочетания устанавливаются из анализа всех возможных реальных вариантов одновременного действия различных нагрузок и с учетом возможности реализации различных схем приложения кратковременных нагрузок или отсутствия некоторых из них (в т. ч. нагрузки от транспортных средств).

Вероятность одновременного достижения несколькими нагрузками их расчетных значений учитывается коэффициентом сочетания нагрузок  $\psi$ , вводимым при определении нормируемого коэффициента устойчивости склона. При этом коэффициенты сочетаний для отдельных видов нагрузок в расчет не вводятся.

В особых сочетаниях коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$  для постоянных, длительных и кратковременных нагрузок следует принимать равным единице, то есть в расчетах используются значения нагрузок соответствующие их нормативным величинам.

В качестве основной характеристики особой нагрузки – сейсмического воздействия – устанавливается его расчетное значение с учетом возможных социальных и материальных потерь в случае разрушения автомобильной дороги и необходимых мер по предотвращению ее разрушения.

При наличии на оползнеопасном склоне каких-либо зданий и сооружений (помимо автомобильной дороги) в расчетах устойчивости следует учитывать нагрузки передаваемые ими на грунтовый массив в соответствии с СП 14.13330 и СП 20.13330.

### **Нормативные нагрузки от веса конструктивных элементов автомобильной дороги и грунтов**

Геометрические параметры конструктивных элементов автомобильной дороги принимают по проектным значениям или результатам изысканий (на существующих автомобильных дорогах).

Нормативное значение веса конструктивных элементов автомобильной дороги определяют по проектным размерам и удельному весу материалов и грунтов с учетом их влажности в условиях эксплуатации.

Нормативные значения веса грунтов, слагающих оползнеопасный склон, устанавливаются по удельному весу, приводимому в материалах инженерно - геологических изысканий.

При определении нагрузок от грунта следует учитывать нагрузки от складированных материалов, оборудования и транспортных средств, передаваемые на грунт.

### **Нормативные нагрузки от автотранспортных средств и пешеходов**

При расчете устойчивости оползнеопасных участков автомобильных дорог нормативная нагрузка от автотранспортных средств устанавливается в соответствии с ГОСТ Р 52748 в виде нагрузки НК.

Нормативная нагрузка НК представлена в виде одиночной четырехосной тележки с нагрузкой на каж-

дую ось 18 К (кН). Класс нагрузки К для расчетов устойчивости принимается равным 8,3.

При расчете устойчивости нагрузка от транспортных средств приводится к эквивалентному слою грунта земляного полотна (рисунок 3).

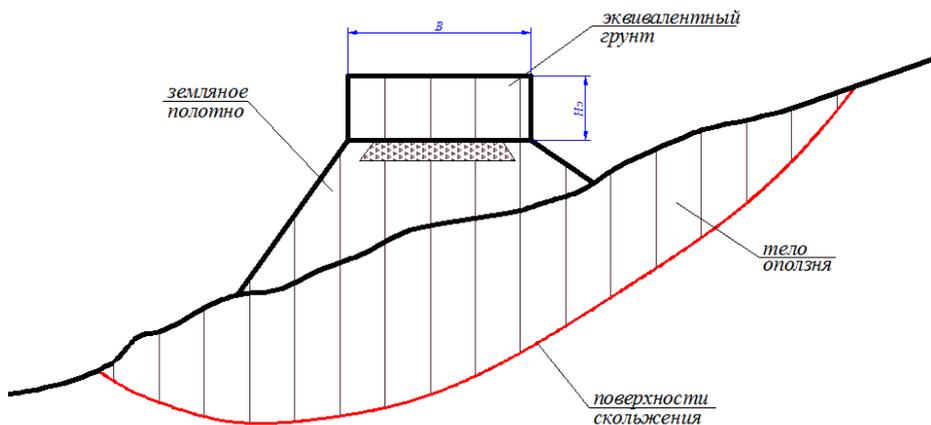


Рисунок 3 – Схема нагружения для расчета устойчивости оползнеопасных склонов

Толщину эквивалентного слоя грунта  $H_э$ , м, вычисляют по формуле:

$$H_э = \frac{44,9}{\gamma_{гр}}, \quad (2)$$

где  $\gamma_{гр}$  – удельный вес грунта,  $\text{кН/м}^3$ .

Эквивалентный слой грунта располагается по всей ширине земляного полотна. Вдоль земляного полотна эквивалентный слой грунта распространяется на неограниченную длину.

В необходимых случаях моделирование эквивалентного слоя грунта в расчетной схеме может быть заменено заданием равномерно распределенной нагрузки с интенсивностью  $q = 44,9 \text{ кН/м}^2$  или соответствующей сосредоточенной силы.

Интенсивность нормативной нагрузки от пешеходов на тротуарах (служебных проходах) и пешеходных мостах составляет  $4 \text{ кН/м}^2$ .

## **ЛЕКЦИЯ 4**

### ***РАСЧЕТНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ***

Расчетные сейсмические воздействия для оползнеопасного участка автомобильной дороги устанавливаются в зависимости от сейсмичности района или площадки строительства, инженерно-геологических условий и уровня ответственности объекта.

Сейсмичность района строительства определяют по картам общего сейсмического районирования ОСР-97 или по списку населенных пунктов, расположенных в сейсмических районах приведенных в СП 14.133330. Приведенные в СП карты ОСР-97 отражают вероятности возможного превышения (карта А – 10 %, карта В – 5 %, карта С – 1 %) в течение 50 лет указанных на картах значений сейсмической интенсивности.

Выбор карты осуществляется в зависимости от уровня ответственности и категории автомобильной дороги. Решение о выборе карты для оценки сейсмичности района при проектировании автомобильной дороги принимает заказчик по представлению генерального проек-

тировщика. Рекомендуется при выборе карты пользоваться таблицей 1.

На отдельных участках одного и того же по балльности района фактическая сила землетрясений может отличаться от средней (указанной на картах ОСР) в зависимости от геологических условий. Местные инженерно-геологические и геоморфологические условия должны учитываться при определении расчетной сейсмичности площадки.

Расчетную сейсмичность для всех оползнеопасных участков автомобильных дорог следует устанавливать по результатам СМР, выполняемого в составе инженерных изысканий. Сейсмическое микрорайонирование участка строительства осуществляется для учета влияния местных инженерно-геологических и геоморфологических условий на сейсмичность участков строительства в соответствии с [6] и другими документами.

Таблица 1 – Выбор карты ОСР-97 для целей оценки устойчивости склонов в зависимости от уровней ответственности и категории автомобильной дороги

| Класс автомобильной дороги по ГОСТ Р 52398 | Категория автомобильной дороги | Уровень ответственности | Карта общего сейсмического районирования |
|--|--------------------------------|-------------------------|--|
| Автомагистраль                             | IA                             | Повышенный              | B  |
| Скоростная дорога                          | IB                             |                         | A  |
| Дорога обычного типа                       | IB                             |                         |  |
|  | II                             |                         |  |
|  | III                            | Нормальный              |  |
|  | IV                             |                         |  |
|  | V                              | Пониженный              | —  |

Микросейсмораионирование выполняется методом инструментальных измерений амплитуд смещений частиц грунта, амплитуд скоростей и ускорений этих смещений от дозированных стандартных возбуждений. Измерения ведутся с помощью сейсмографов и регистрирующей сейсмической аппаратуры (шлейфовые осциллографы, типовые сейсмостанции). Стандартное возбуждение производится грузом падающим с дозированной высоты. Помимо перечисленных величин по сейсмограммам могут быть определены преобладающие периоды указанных смещений колебаний грунтов, а также получен полный спектр частот.

Материалы работ по сейсмическому микрораионированию участков должны содержать количественные оценки влияния особенностей залегания слоев и сейсмических свойств грунта расчетной толщи на амплитудные и спектральные характеристики сейсмического воздействия.

Число микрозон различной сейсмической опасности, выделяемых на участке строительства, определяют

в зависимости от неоднородности строения исследуемой грунтовой толщи и изменчивости сейсмических свойств грунта.

Сейсмичность площадок строительства насыпей земляного полотна автомобильных дорог следует определять в зависимости от сейсмических свойств грунта верхнего 10-метрового слоя основания насыпи.

Сейсмичность площадок строительства выемок определяют в зависимости от сейсмических свойств грунта 10-метрового слоя, считая от контура откосов выемки.

При сейсмическом микрорайонировании участков строительства амплитудные характеристики колебаний грунта корректируют с учетом местных инженерно-геологических и геоморфологических условий.

Скорости поперечных сейсмических волн в слоях находят по данным сейсморазведки или применяя корреляционные уравнения, связывающие физические, прочностные и деформационные свойства грунтов со значением скорости поперечных сейсмических волн.

При сейсмическом микрорайонировании участков дорог, расположенных на крутых горных склонах, амплитудные характеристики колебаний грунта корректируют в зависимости от рельефа местности.

Сейсмичность площадки строительства объектов, использующих карту А, при отсутствии данных СМР допускается предварительно определять в зависимости от грунтовых условий

Категория грунта и его физико-механические и сейсмические характеристики должны определяться с учетом возможных техногенных изменений свойств грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружения.

Кроме участков, сложенных грунтами III и IV категорий неблагоприятными в сейсмическом отношении являются участки автомобильной дороги, на которых выявлены тектонические нарушения или с близким расположением линий тектонических разрывов, перекрытые чехлом рыхлых отложений мощностью менее 10 м; участки склонов с крутизной более 15°; участки местно-

сти с сильно расчлененным рельефом – обрывистые берега, овраги, ущелья; участки при глубине грунтовых вод менее 4 м для уступов, сложенных глинистыми породами и песками.

В неблагоприятных геологических условиях, указанных выше, средняя сейсмическая балльность района должна повышаться на один балл; при благоприятных условиях – понижаться на один балл.

На неблагоприятных в геологическом отношении участках следует принимать дополнительные меры по укреплению оснований автомобильной дороги, усилению конструктивных элементов и инженерной защите.

Расчетные сейсмические воздействия при применении динамической теории должны задаваться расчетными акселерограммами, которые при необходимости масштабируют. Расчетные акселерограммы должны подбираться с учетом данных о скоростных, частотных и резонансных характеристиках грунтов, залегающих в основании сооружения.

Должны применять расчетные акселерограммы:

- из числа записей, произведенных на площадке или в районе сооружения;

- аналоговые из числа записей, сделанных в районах, сходных с районом площадки строительства по сеймотектоническим, геологическим и другим сейсмологическим условиям;

- синтезированные, сформированные в соответствии с расчетными параметрами сейсмического воздействия.

Амплитудные характеристики колебаний грунта в горизонтальной плоскости для площадок с расчетной сейсмичностью 7, 8, 9 баллов, расположенных на относительно ровных участках местности и сложенных средними по сейсмическим свойствам грунтами, принимаются следующими:

- при сейсмичности 7 баллов:  $100 \text{ см/с}^2$  – ускорения;  $8,0 \text{ см/с}$  – скорости;  $4,0 \text{ см}$  – перемещения;

- при сейсмичности 8 баллов:  $200 \text{ см/с}^2$  – ускорения;  $16,0 \text{ см/с}$  – скорости;  $8,0 \text{ см}$  – перемещения;

- при сейсмичности 9 баллов:  $400 \text{ см/с}^2$  – ускорения;  $32,0 \text{ см/с}$  – скорости;  $16,0 \text{ см}$  – перемещения.

Примечание – К средним по сейсмическим свойствам грунтам относят песчано-глинистые отложения с сейсмической жесткостью  $\rho V_s = 655 \text{ т/м}^2 \cdot \text{с}$ , где  $\rho$  – плотность грунта,  $\text{т/м}^3$ ;  $V_s$  – скорость поперечной сейсмической волны в грунте,  $\text{м/с}$ .

Для автомагистралей с целью определения силы максимального землетрясения по комплексу геологических, геофизических и геохимических данных составляют карты опасных сейсмогенерирующих структур в радиусе  $100 \text{ км}$  от объекта. На этой основе с учетом сейсмологических сведений (наблюдаемая, историческая и палеосейсмичность) выделяются зоны возможных очагов землетрясений и от этих зон рассчитывают сейсмические воздействия для средних по сейсмическим свойствам грунтов и ровных площадок на участке строительства.

При выполнении геофизических исследований для обеспечения строительства объекта особой сейсмостой-

кости, как правило, следует проводить сейсмологические наблюдения сетью временных станций с целью подтверждения данных о выделенных по фондовым и справочным материалам активных очагах землетрясений по инструментально зафиксированным слабым толчкам и получения информации о распределении их эпицентров по глубине.

## **ЛЕКЦИЯ 5**

### ***ПСЕВДОСТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА И МЕТОД ПОВОРОТА СКЛОНА***

Псевдостатический подход в оценке и прогнозе степени устойчивости оползнеопасных склонов автомобильных дорог основывается на применении теории предельного равновесия, рассматривающей предельное напряженное состояние грунтового массива. Расчет ведется в предположении статического действия сейсмических сил.

В расчетной модели принимается ряд условных допущений:

- используется гипотеза затвердевшего тела (призма возможного смещения рассматривается в виде затвердевшего клина);
- рассматривается узкая полоса склона шириной 1 м; условия ее работы сохраняются для всего склона;
- задается определенная форма поверхности скольжения;

- в некоторых методах силы взаимодействия между отсеками, на которые разбивается оползневой блок, не учитываются;

- в отдельных случаях теория предельного равновесия применяется к грунтовому массиву, находящемуся в запредельном состоянии (при  $k_{st} < 1$ ).

Для определения минимального расчетного значения коэффициента устойчивости оползнеопасного склона  $k_{st}$  должны быть рассмотрены все вероятные поверхности скольжения в зависимости от вида грунтов, слагающих массив, наличия зон ослабления и др. факторов.

Массив грунта, ограниченный линией рельефа и поверхностью скольжения (оползневой блок или оползневой массив) разбивается вертикальными линиями на отсеки (рисунок 4). Отсеки принимаются такими, чтобы без потери точности можно было в их пределах принимать поверхность за плоскость, а состояние грунта, очертание склона, действие внешних сил и т. п. практически однородными. При круглоцилиндрической поверхности скольжения количество отсеков и расстояния

между их боковыми гранями выбирается таким образом, чтобы образованная подошвами отсеков ломаная линия достаточно близко соответствовала дуге окружности. В подошве отсека дуга линии скольжения при этом заменяется отрезком прямой линии. Как правило, ширина отсеков не должна превышать  $5 \div 6$  м.

Для каждого отсека рассматриваются силы, действующие в нем (рисунок 5) в зависимости от метода расчета (в некоторых методах пренебрегают отдельными силами).

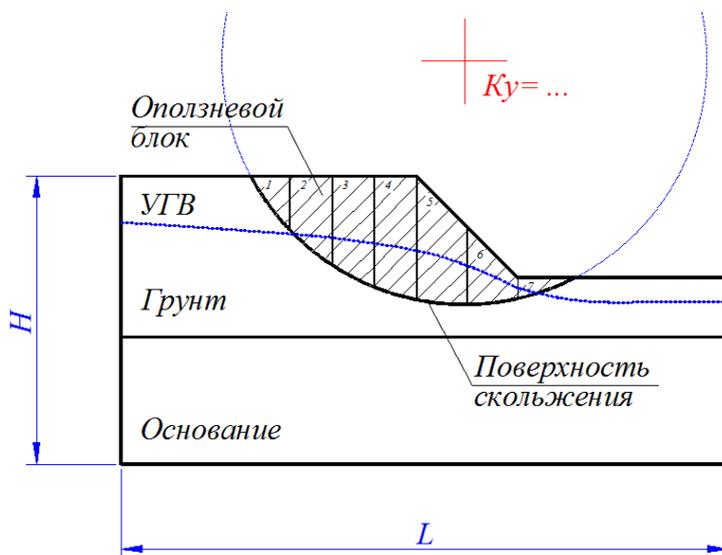


Рисунок 4 – Разбивка оползневой блока на отсеки

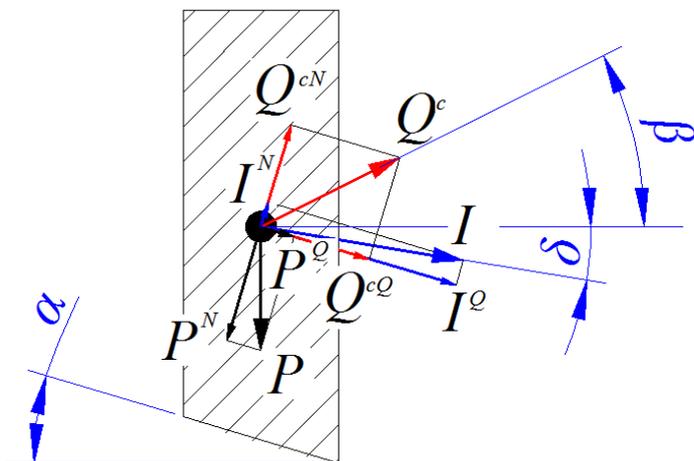


Рисунок 5 – Схема сил, действующих в отсеке

В общем случае сейсмическая сила  $Q^c$  может иметь любое направление в пространстве. Направление сейсмического воздействия должно быть единым по длине всего оползневого блока (соответствующим направлению ускорения сейсмической волны). Рекомендуется принимать ее направление наиболее неблагоприятным.

Сейсмическое воздействие вызывает дополнительные вертикальные и горизонтальные силы в оползневом массиве. В большинстве случаев роль вертикаль-

ной составляющей сейсмической силы сравнительно мала и может не учитываться при оценке устойчивости. Поэтому, как правило, направление сейсмических сил принимается горизонтальным.

Для упрощения расчетов в запас прочности допускается принимать, что сейсмические силы в каждом отсеке оползневого блока направлены параллельно основанию отсека, то есть совпадают с направлением сдвигающей силы в этом отсеке. В этом случае при разбивке оползневого блока на отсеки сейсмические силы учитываются в отдельности при рассмотрении каждого отсека (складывают их со сдвигающими силами).

При сплошном водонасыщении оползневого массива сейсмические силы следует учитывать не только от веса грунта, но аналогичным образом и от веса воды.

Величина результирующей сейсмической силы принимается равной произведению веса отсека на коэффициент сейсмичности  $\mu$ :

$$Q_i^c = \mu \cdot p_i, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент сейсмичности;  
 $p_i$  – вес отсека.

Значения коэффициента  $\mu$  при расчете естественных склонов определяются по таблице 2 в зависимости от расчетной сейсмичности участка, а при расчете искусственных откосов (насыпи дорог) значения коэффициента из таблицы 2 следует (приближенно) увеличивать в 1,5 раза.

Для обводненных пород вес отсека принимается без поправки на гидростатическое взвешивание.

Коэффициент устойчивости оползнеопасного склона автомобильной дороги с учетом сейсмического воздействия при отсутствии водоносных горизонтов в массиве пород определяется по формуле:

$$k_{st} = \frac{\sum p_i (\cos \alpha_i - \mu \sin \alpha_i) \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i \cdot 1\text{м} + \sum p_i \sin \alpha_i''}{\sum p_i \sin \alpha_i' + \sum p_i \mu \cos \alpha_i}, \quad (4)$$

где  $p_i$  – вес  $i$ -го расчетного отсека, ограниченного вертикальными гранями, кН;  
 $\alpha_i$  – угол наклона подошвы отсека, град;

$\alpha_i'$  – угол наклона подошвы отсека, град, для участков, где линия скольжения направлена в сторону падения поверхности уступа;

$\alpha_i''$  – угол наклона подошвы отсека, град, для участков, где линия скольжения имеет уклон, обратный падению поверхности уступа;

$l_i$  – длина подошвы отсека, м;

$\varphi_i, c_i$  – соответственно угол внутреннего трения, град, и сцепление, кПа, для пород, определяющих величину сопротивления сдвигу по подошве отсека.

### Примечания

1 Для непригруженных отсеков вес отсека

$$p_i = S_i \gamma_i \cdot l_m, \quad (5)$$

где  $S_i$  – площадь сечения отсека, м<sup>2</sup>;

$\gamma_i$  – средний удельный вес в пределах отсека, кН/м<sup>3</sup>.

При наличии на поверхности отсека сооружений, оборудования, насыпей и других нагрузок их вес при определении суммируется с весом пород, слагающих отсек.

2 Величины  $\alpha_i'$  и  $\alpha_i''$  принимаются положительными; величины  $\alpha_i$  при уклоне подошвы отсека в сторону

*падения уступа считаются положительными, при обратном уклоне – отрицательными.*

В расчетах устойчивости оползнеопасных склонов, насыщенных полностью или частично грунтовыми водами необходимо учитывать дополнительное воздействие вод. Вода оказывает взвешивающее воздействие на слагающие склон породы, изменяет физико-механические характеристики, уменьшая величину сопротивления сдвигу. При движении грунтовых вод проявляется фильтрационное давление. При наличии градиента (если наблюдается уклон поверхности свободного подземного потока или линии пьезометрического уровня для напорных вод) появляется падение напора. Падение напора вызывается преодолением сопротивления течению воды в грунте. Это сопротивление в виде реакции создает фильтрационное давление.

Т а б л и ц а 2 – Значения коэффициента сейсмичности

|                                 |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| Расчетная сейсмичность в баллах | 7     | 8     | 9     |
| Коэффициент сейсмичности $\mu$  | 0,025 | 0,050 | 0,100 |

Коэффициент устойчивости оползнеопасного склона автомобильной дороги с учетом сейсмического воздействия (вектор сейсмической силы принят направленным горизонтально) при наличии водоносных горизонтов в массиве пород, пересекаемых линией скольжения следует определять по формуле:

$$k_{st} = \frac{\sum [p_i' \cos \alpha_i + \gamma_w S_i^G I_i \sin(\beta_i - \alpha_i) \cdot 1m - p_i \mu \sin \alpha_i] \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i I_i \cdot 1m + \sum p_i' \sin \alpha_i'}{\sum p_i' \sin \alpha_i' + \sum \gamma_w S_i^G I_i \cos(\beta_i - \alpha_i) \cdot 1m + \sum p_i \mu \cos \alpha_i} \quad (6)$$

где  $p_i$  – вес отсека без учета гидростатического взвешивания, кН;

$p_i' = (p_i - \gamma_w S_i^G \cdot 1m)$  – вес отсека с учетом гидростатического взвешивания, кН (для отсеков, подошва которых находится в пределах водоносного горизонта);

$\mu$  – коэффициент сейсмичности;

$\gamma_w$  – удельный вес воды, равный 10 кН/м<sup>3</sup>;

$S_i^G$  – площадь сечения обводненной части отсека, м<sup>2</sup>;

$I_i$  – гидравлический градиент в пределах отсека;  
 $\alpha_i$  – угол наклона подошвы отсека, град (величина  $\alpha_i$  при уклоне подошвы отсека в сторону падения уступа принимается положительной, при обратном уклоне – отрицательной);

$\beta_i$  – угол наклона равнодействующей фильтрационного давления, град (величины  $\beta_i$  при направлении фильтрационного потока в сторону падения уступа принимаются положительными, при обратном направлении потока – отрицательными).

Примечание – Для отсеков, подошва которых залегает выше или ниже водоносного горизонта, в формуле (10) вместо значений  $p_i'$  следует подставлять величины  $p_i$ ; при этом  $S_i^B = 0$ .

При круглоцилиндрической поверхности скольжения кроме вышеуказанного метода сил может быть использован метод моментов, в котором рассматривается вращение оползающего массива вокруг центра  $O$  (рисунок б).

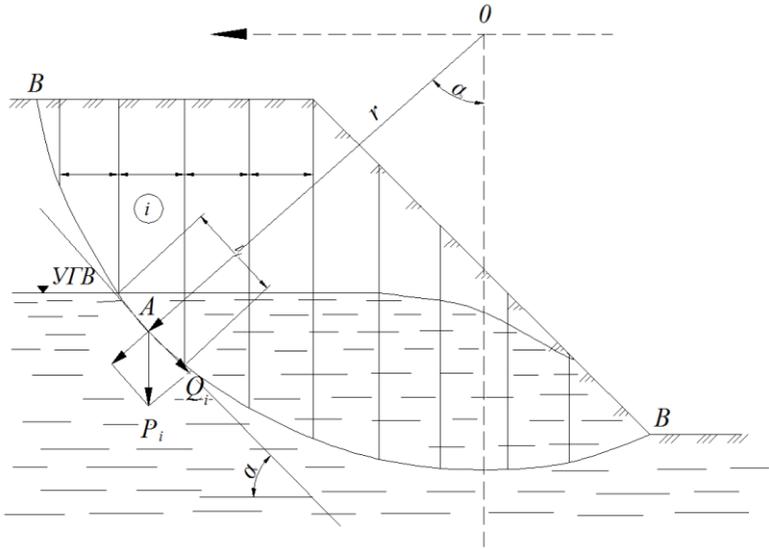


Рисунок 6 – Схема оползневого массива для метода моментов

Координаты центра вращения  $O$  и радиус  $r$  определяются таким, чтобы отразить в расчете наиболее невыгодное положение принимаемой поверхности скольжения, при котором коэффициент устойчивости является минимальным. Положение центра  $O$  может быть установлено подбором путем проведения нескольких расчетов.

Расчетное значение коэффициента устойчивости при этом определяется как отношение суммы моментов

$M_{y\delta}$  удерживающих массив к сумме моментов  $M_{ep}$  вращающихся массив:

$$k_{st} = \frac{\sum M_{y\delta}}{\sum M_{ep}} \quad (7)$$

Для каждого отсека определяют силы сопротивления сдвигу и сдвигающие силы и плечи этих сил. Вращающий момент определяется умножением сдвигающих сил на плечо до центра вращения  $O$ , а удерживающий момент – умножением сил сопротивления сдвигу на аналогичное плечо.

Для расчетов устойчивости склонов, поверхность скольжения которых с достаточной степенью точности может быть заменена дугой, рекомендуется к применению метод, основанный на решении системы уравнений равновесия сил и равновесия моментов.

Для расчетов с учетом всех условий статического равновесия (включая равновесие моментов) необходимо выбрать точку вращения отсековой модели оползня. Точка выбирается на равном удалении от всех точек поверхности скольжения.

Следует учитывать основные допущения данного метода:

- прочность грунта на сдвиг подчиняется критерию Кулона – Мора;
- локальные коэффициенты устойчивости всех отсеков равны;
- оползневое смещение происходит по схеме сдвига с опрокидыванием относительно единого центра вращения;
- сила нормальной реакции по подошве отсека приложена к ее середине;
- результирующая силы тяжести отсека, горизонтальная и вертикальная составляющие результирующей силы сейсмической нагрузки приложены к центру тяжести отсека;
- соотношение нормальной и касательной межотсековых сил подчиняется функции  $f(x)$ , где  $x$  – относительная координата грани отсека.

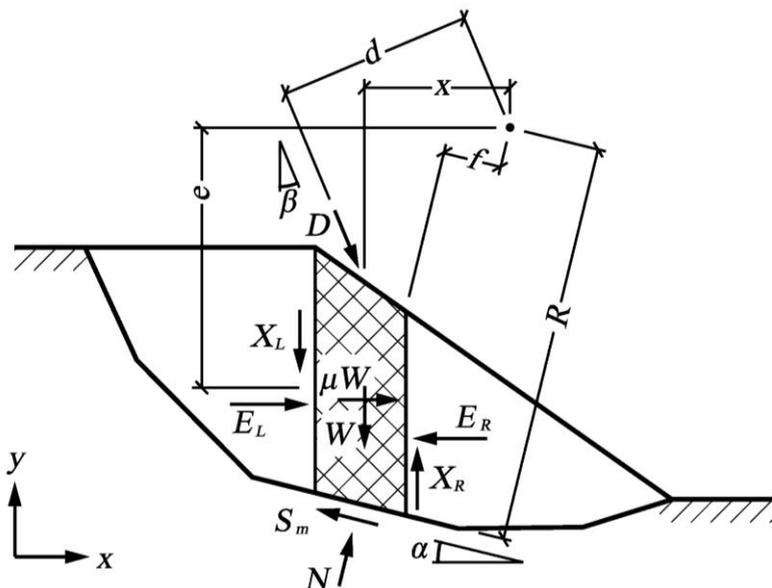


Рисунок 7 – Расчетная схема метода равновесия сил и моментов

Коэффициент устойчивости из условия равновесия сил определяется по формуле:

$$k_{st}^f = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i] \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n N_i \sin \alpha_i + \mu_h \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=1}^n D_i \sin \beta_i}; \quad (8)$$

коэффициент устойчивости из условия равновесия моментов сил:

$$k_{st}^m = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i] R_i}{\sum_{i=1}^n N_i f_i + \sum_{i=1}^n W_i x_i + \mu_v \sum_{i=1}^n W_i x_i + \mu_h \sum_{i=1}^n W_i e_i + \sum_{i=1}^n D_i d_i}; \quad (9)$$

сила нормальной реакции в основании отсеков:

$$N_i = \frac{W_i + \mu_v W_i - (X_i^R - X_i^L) + \frac{u_i \operatorname{tg} \varphi_i - c_i}{F_j} l_i \sin \alpha_i + D_i \cos \beta_i}{\cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i}{K_{f(m)}}}; \quad (10)$$

сила нормальной реакции в основании отсеков (без учета межотсековых сил):

$$N_i^{ynp} = W_i \cos \alpha_i + \mu_v W_i \cos \alpha_i - \mu_h W_i \sin \alpha_i + D_i \cos(\alpha_i + \beta_i);$$

касательная межотсековая сила по граням отсеков:

$$X = E \cdot \lambda \cdot f(x);$$

нормальная межотсековая сила по граням отсеков:

$$E_i^R = E_i^L + N_i \left( \sin \alpha_i - \frac{\operatorname{tg} \varphi_i \cos \alpha_i}{K_{f(m)}} \right) + \frac{u_i \operatorname{tg} \varphi_i - c_i}{K_{f(m)}} l_i \cos \alpha_i + \mu_h W_i + D_i \sin \beta_i,$$

где  $i$  – номер рассматриваемого отсека;

$n$  – общее количество отсеков;

$\alpha$  – угол наклона основания отсека к горизонту, град;  
 $l$  – длина основания отсека, м;  
 $c$  – удельное сцепление в грунте в основании отсека, кПа;  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта в основании отсека, град;  
 $W$  – вес грунта в отсеке, кН;  
 $N$  – нормальная реакция в основании отсека, кН;  
 $E$  – нормальная составляющая межотсековых сил, кН;  
 $X$  – касательная составляющая межотсековых сил, кН;  
 $D$  – результирующая сила внешней нагрузки, кН;  
 $u$  – величина порового давления, кПа;  
 $\mu$  – коэффициент сейсмичности;  
 $f$  – плечо силы нормальной реакции в основании отсека  $N$ , м;

$R$  – плечо силы сопротивления грунта сдвигу  
 $x$  – плечо силы тяжести отсека  $W$ , м;  
 $e$  – плечо горизонтальной составляющей сейсмической нагрузки, м;  
 $d$  – плечо результирующей внешней нагрузки  $D$ , м;  
 $\beta$  – угол наклона результирующей внешней нагрузки  $D$ , град;  
 $\lambda$  – коэффициент межотсековой функции (в долях);  
 $f(x)$  – функция межотсековых сил.

#### Примечания

1 Индекс L означает сечение с меньшей координатой  $x$ , индекс R соответственно относится к сечению с большей координатой  $x$ ;

2 Индексы  $h$  и  $v$  означают горизонтальную и вертикальную составляющие соответственно.

Сходимость коэффициентов устойчивости из условия равновесия сил  $k_{sf}^f$  и моментов сил  $k_{sf}^m$  обеспечивается за счет подбора соответствующего значения коэффициента  $\lambda$ . Значения коэффициента  $\lambda$  принимаются в долях от единицы. На практике интервал значений  $\lambda$  рекомендуется принять от 0 до 1,25.

Функция межотсековых сил  $f(x)$  представляет собой зависимость наклона результирующей межотсекковой силы от положения расчетного сечения по длине оползня. В качестве аргумента функции используется относительная координата  $x_{rel}$  рассматриваемого сечения:

$$x_{rel} = \frac{x - x_0}{x_n - x_0}, \quad (11)$$

где  $x$  – координата расчетного сечения, м;

$x_0$  – координата первого сечения (в голове оползня), м;

$x_n$  – координата последнего сечения (в языке оползня), м.

В качестве функции межотсековых сил  $f(x)$  может приниматься любая зависимость в функциональной или

табличной форме. Наиболее распространенные зависимости:

- постоянная  $f(x) = \text{const}$  ;
- полусинусоида  $f(x) = \sin(\pi \cdot x)$ .

Постоянную функцию рекомендуется применять для протяженных оползней, функцию полусинусоиды – для оползней с поверхностью скольжения круглоцилиндрической (близкой к круглоцилиндрической) формы.

Допускается использовать иные общепринятые методы расчета коэффициента устойчивости склона с псевдостатическим заданием сейсмического воздействия.

## ЛЕКЦИЯ 6

### *ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА*

Динамический метод расчета устойчивости оползнеопасных участков автомобильных дорог рекомендуется применять при наличии необходимых исходных данных (в виде акселерограмм для района строительства).

Расчет устойчивости оползнеопасного склона динамическим методом выполняется на основе акселерограмм (рисунок 8) с учетом продолжительности и интенсивности землетрясения. Изменения ускорения во времени могут быть заданы в горизонтальном и вертикальном направлении.

Шаг времени акселерограммы должен быть таким, чтобы включать время пиковых и внезапных изменений. Для особо ответственных участков автомобильных дорог рекомендуется выполнять расчет несколько раз для разных интервалов временного шага, чтобы определить влияние временных интервалов на устойчивость склона.

Динамический анализ базируется на конечно-элементном решении уравнения движения следующего вида:

$$[K]\{d\} + [D]\{v\} + [M]\{a\} = \{F\}, \quad (12)$$

где  $\{d\}$  – вектор узловых перемещений;

$\{v\}$  – вектор узловых скоростей;

$\{a\}$  – вектор узлового ускорения;

$[K]$  – матрица жесткости;

$[D]$  – матрица затухания колебаний;

$[M]$  – матрица масс;

$\{F\}$  – вектор узловых сил.

Динамические усилия прикладываются ко всем узлам в сетке конечных элементов, то есть ускорение прикладывается ко всем массам области грунта.

Расчет устойчивости склона на основе динамического анализа выполняется в следующей последовательности:

- на первом шаге (статический анализ) решается задача определения напряжений и деформаций, действующих в массиве грунтов в естественном состоянии;

- на втором шаге (динамический анализ) решается задача определения напряжений и деформаций при прохождении в массиве грунтов сейсмических волн. Расчет, полученный в результате статического анализа, является начальным условием для проведения динамического анализа.

Полученные результаты используются при расчете коэффициента устойчивости склона.

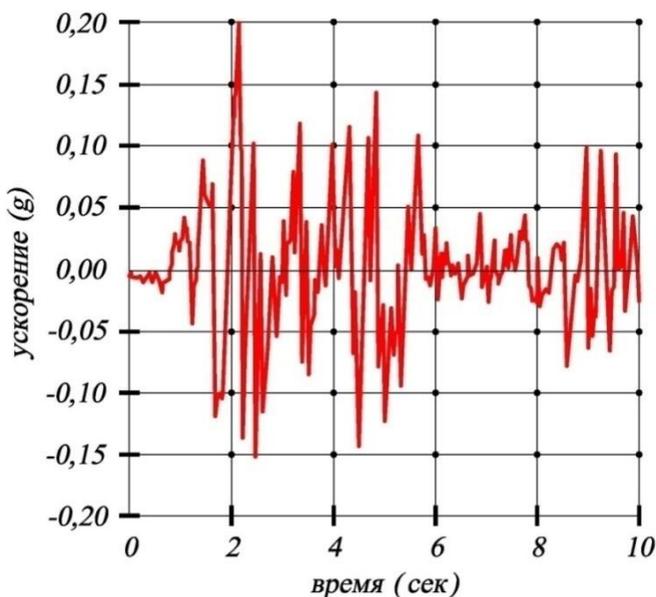


Рисунок 8 – Пример акселерограммы

При расчете устойчивости склонов динамическим методом рекомендуется учитывать влияние разжижения на устойчивость.

При численном моделировании нижняя граница расчетной области, как правило, ограничивается скальным основанием, а боковые требуют принятия специальных ограничений перемещений.

Вектор нагрузок может быть составлен из различных сил:

$$\{F\} = \{F_b\} + \{F_s\} + \{F_n\} + \{F_g\}, \quad (13)$$

где  $\{F_b\}$  – собственный вес грунта;

$\{F_s\}$  – силы поверхностного давления;

$\{F_n\}$  – сосредоточенная узловая сила;

$\{F_g\}$  – нагрузка от сейсмических колебаний.

Матрица масс может быть определена в виде матрицы распределенных масс или матрицы сосредоточенных масс.

Матрица распределенных масс:

$$[M] = \int_v \rho[\psi] dV, \quad (14)$$

Матрица сосредоточенных масс:

$$[M] = \int_V \rho \langle N \rangle^T \langle N \rangle dV, \quad (15)$$

где  $\rho$  – сосредоточенная (массовая) плотность;

$\langle N \rangle$  – вектор ряда интерполирующих функций;

$[\psi]$  – диагональная матрица коэффициентов распределения массы.

Матрица затухания колебаний определяется как сумма линейной матрицы массы и матрицы жесткости:

$$[D] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (16)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – скаляры, названные Рэлеевскими коэффициентами демпфирования. Они связаны с коэффициентом демпфирования  $\eta$  следующей формулой:

$$\eta = \frac{\alpha + \beta\omega^2}{2\omega}, \quad (17)$$

где  $\omega$  – частота колебаний.

Матрица жесткости определяется следующим образом:

$$[K] = \int_V [B]^T [C] \cdot [B] dV, \quad (18)$$

где  $[B]$  – матрица «напряжений-деформации»;

$[C]$  – матрица упругости.

Вектор деформаций определяется из следующего выражения:

$$\{\varepsilon\} = [B] \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}, \quad (19)$$

где  $[B]$  – матрица деформаций;

$u, v$  – узловые перемещения в направлениях по оси  $X$  и  $Y$ , соответственно.

Вектор деформации также определяется составляющими:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (20)$$

Для задачи плоской деформации  $\varepsilon_z$  равен нулю, и матрица деформаций имеет вид:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial y} & \frac{\partial N_8}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

В соответствии с теорией упругости основная формула зависимости напряжений и деформаций имеет вид:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}, \quad (22)$$

где  $[C]$  – матрица упругости, определяемая по следующей зависимости:

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где  $E$  – модуль Юнга (модуль упругости при растяжении);

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Напряжения вычисляются в каждой точке сетки конечных элементов с помощью матрицы  $[C]$  следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [C] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (24)$$

В результате преобразования формул (24) и (24) получаем формулу для определения напряжений и деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

Коэффициент устойчивости определяется в каждый момент времени землетрясения как соотношение суммы сдвиговой прочности грунта и сдвигающих усилий по поверхности скольжения:

$$k_{st} = \frac{\sum S_r}{\sum S_m}, \quad (26)$$

где  $\sum S_r$  – суммарная сдвиговая прочность грунта по поверхности скольжения;

$\sum S_m$  – сумма сдвигающих усилий по поверхности скольжения.

Расчет сдвигающей  $S_m$  и удерживающей  $S_r$  сил в каждом отсеке производится с учетом длин его основания:

$$S_r = \tau_r l ; \quad (27)$$

$$S_m = \tau_m l . \quad (28)$$

Расчет сдвиговой прочности грунта  $\tau_r$  в середине основания отсека производится с использованием критерия прочности Кулона – Мора:

$$\tau_r = (\sigma_n - u) \operatorname{tg} \varphi + c , \quad (29)$$

где  $\sigma_n$  – нормальное напряжение в середине основания отсека, кПа;

$u$  – поровое давление в середине основания отсека, кПа.

Расчет нормального  $\sigma_n$  и касательного  $\tau_m$  напряжений в середине основания каждого отсека производится с использованием формул:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta ; \quad (30)$$

$$\tau_m = \tau_{xy} \cos 2\theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta ; \quad (31)$$

где  $\sigma_x$  – полное напряжение в направлении оси  $X$  в середине основания отсека, кПа;

$\sigma_y$  – полное напряжение в направлении оси  $Y$  в середине основания отсека, кПа;

$\tau_{xy}$  – касательное напряжение в плоскости  $XOY$  в центре основания отсека, кПа;

$\theta$  – угол между положительным направлением оси  $X$  и направлением приложения нормального напряжения, град.

Допускается также определять коэффициент устойчивости склона с учетом сейсмического воздействия без разбиения оползневого массива на отсеки исходя из величин нормального и касательного напряжений на элементарных площадках вдоль потенциальной кривой скольжения или методом снижения прочностных характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] СП 11–103–97 Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 1997. – 34 с.

[2] СП 11–104–97 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 1997. – 76 с.

[3] СП 11–105–97 Часть I Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ. Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 1997. – 81 с.

[4] СП 11–105–97 Часть II Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2000. – 100 с.

[5] СП 11–105–97 Часть V Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть V. Правила производства работ в районах с особыми при-

родно-техногенными условиями. Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2003. – 34 с.

[6] МДС 22–1.2004 Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений. МИИТ. – М.: ФГУП ЦПП, 2004.

[7] Метод лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости немерзлых песчаных и глинистых грунтов при динамических нагрузках. ВНИПИморнефтегаз. – 1992.

[8] ОДМ 218.2.006–2010 Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог. Росавтодор. – М.: Информавтодор, 2010. – 114 с.