ОДМ218.2.053–2015

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
РОСАВТОДОР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИОПОЛЗНЕВЫХ УЧАСТКОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)

МОСКВА 2015

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН обществом с ограниченной ответственностью «НТЦ ГеоПроект» (ООО «НТЦ ГеоПроект»).

Руководитель работ – доктор техн. наук, профессор Маций С. И. Документ разработан канд. техн. наук Деревенцом Ф. Н., канд. техн. наук Любарским Н. Н., канд. техн. наук Плешаковым Д. В., инж. Шелестовым С. А.

2 ВНЕСЕН Управлением научно-технических исследований, информационного обеспечения и ценообразования, Управлением проектирования и строительства автомобильных дорог Федерального дорожного агентства.

3 ИЗДАН на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 08.10.2015 № 1866-р

4 ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 2
3 Термины и определения 3
4 Общие положения 7
5 Расчеты устойчивости склона на сейсмическое воздействие 10
5.1 Общие указания 10
5.2 Нагрузки и воздействия 13
5.3 Характеристики грунтов 24
5.4 Расчетные положения 28
5.5 Псевдостатический метод 33
5.6 Метод поворота склона 43
5.7 Динамический метод 48
Приложение А (справочное)Пример расчета устойчивости склона псевдостатическим методом 54
Приложение Б (справочное) Пример расчета устойчивости склона динамическим методом 58
Библиография 62

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

Оценка сейсмического воздействия при определении устойчивости оползневых участков автомобильных дорог

1 Область применения

1.1 Рекомендации настоящего методического документа распространяются на строительство автомобильных дорог общего пользования I÷IV категорий (в соответствии с ГОСТ Р 52398) в районах с расчетной сейсмичностью до 9 баллов включительно по шкале MSK-64.

1.2 Сейсмическое воздействие для автомобильных дорог V категории допускается не учитывать.

1.3 При необходимости строительства автомобильных дорог на территориях с расчетной сейсмичностью более 9 баллов оценку сейсмического воздействия следует выполнять на основании специальных исследований.

Примечание – В настоящем документе понятие «строительство» включает в себя новое строительство, реконструкцию и капитальный ремонт объектов капитального строительства.

2 Нормативные ссылки

В настоящем ОДМ использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 12248–2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости

ГОСТ 20276–2012Грунты.Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости

ГОСТ 20522–2012Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний

ГОСТ Р 52398–2005Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования

ГОСТ Р 32960–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения

ГОСТ Р 27751–2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования

СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах (актуализированная редакцияСНиП II–7–81*)

СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия (актуализированная редакцияСНиП 2.01.07–85*)

СП 47.13330.2012 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения (актуализированная редакцияСНиП 11–02–96)

СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения (актуализированная редакцияСНиП 22–02–2003)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **акселерограмма (велосиграмма, сейсмограмма):** Зависимость ускорения (скорости, смещения) точки основания или сооружения в процессе землетрясения от времени.

3.2 **акселерограмма синтезированная:** Акселерограмма, полученная с помощью расчетных методов, в том числе, на основе статистической обработки и анализа ряда акселерограмм и/или спектров реальных землетрясений с учетом местных сейсмологических условий.

3.3 **динамический метод анализа:** Метод расчета сооружения или склона на воздействие в виде акселерограмм колебаний грунта путем численного интегрирования уравнений движения.

3.4 **инженерно-геологический элемент (ИГЭ):** Объем грунта одного возраста, происхождения и вида, характеристики свойств которого в пределах выделенного элемента являются статистически однородными и изменяются случайно (незакономерно) либо если наблюдающейся закономерностью можно пренебречь.

3.5 **интенсивность землетрясения:** Оценка воздействия землетрясения в баллах 12-балльной шкалы, определяемая по макросейсмическим описаниям разрушений и повреждений природных объектов, грунта, зданий и сооружений, движений тел, а также по наблюдениям и ощущениям людей.

3.6 **категория грунта по сейсмическим свойствам (I, II, III или IV):** Характеристика, выражающая способность грунта ослаблять (или усиливать) интенсивность сейсмических воздействий.

3.7 **коэффициент надежности по нагрузке:** Коэффициент, учитывающий в условиях нормальной эксплуатации автомобильной дороги возможное отклонение нагрузок в неблагоприятную (большую или меньшую) сторону от нормативных значений.

3.8 **коэффициент сочетаний нагрузок:** Коэффициент, учитывающий уменьшение вероятности одновременного достижения несколькими нагрузками их расчетных значений.

3.9 **максимальное расчетное землетрясение (МРЗ):** Землетрясение максимальной интенсивности на площадке строительства с повторяемостью один раз в 1000 лет. Принимают по комплекту карт ОСР-97 В.

3.10 **нагрузки длительные:** Нагрузки, изменения расчетных значений которых в течение расчетного срока службы строительного объекта пренебрежимо малы по сравнению с их средними значениями.

3.11 **нагрузки кратковременные:** Нагрузки, длительность действия расчетных значений которых существенно меньше срока службы строительного объекта.

3.12 **нормативное значение нагрузок:** Основная базовая характеристика нагрузки, устанавливаемая соответствующими нормами проектирования, техническими условиями или заданием на проектирование.

3.13 **нормативные нагрузки от автотранспортных средств и пешеходов:** Временные вертикальные нагрузки от транспортных средств и пешеходов, принимаемые в виде условных нагрузок для проектирования автомобильных дорог общего пользования.

3.14 **общее сейсмическое районирование (ОСР):**Оценка сейсмической опасности на территории всей страны, выполняемая для осуществления рационального землепользования и планирования социально-экономического развития крупных регионов. Масштаб карт ОСР – 1:2500000÷1:8000000.

3.15 **оползень:** Смещение горных пород со склонов, бортов карьеров, строительных выемок под действием веса грунта и объемных и поверхностных сил. Различают оползни скольжения, оползни выдавливания, вязко-пластические оползни, оползни внезапного разжижения, оползни гидродинамического разрушения.

3.16 **ползучесть грунта:** Процесс деформирования скелета грунта во времени под действием неизменной нагрузки.

3.17 **предельное состояние (прочность) грунта:** Состояние грунта в точке, при котором касательные и нормальные напряжения в элементе грунта связаны критерием прочности (Кулона, Кулона – Мора, Мизеса – Шлейхера и т. д.), а деформации сдвига могут развиваться неограниченно.

3.18 **проектное землетрясение (ПЗ):** Землетрясение максимальной интенсивности на площадке строительства с повторяемостью один раз в 500 лет.

3.19 **расчетная сейсмичность:** Значение расчетного сейсмического воздействия для заданного периода повторяемости, выраженное в баллах макросейсмической шкалы или в кинематических параметрах движения грунта (ускорения, скорости, смещения).

3.20 **расчетное значение нагрузки:** Предельное (максимальное или минимальное) значение нагрузки в течение срока эксплуатации объекта.

3.21 **расчетные сейсмические воздействия:** Сейсмические воздействия, применяемые в расчетах устойчивости склонов (акселерограммы, велосиграммы, сейсмограммы и их основные параметры – амплитуда, длительность, спектральный состав).

3.22 **расчетные ситуации:** Учитываемый при расчете устойчивости склона комплекс наиболее неблагоприятных условий, которые могут возникнуть при эксплуатации дорожного объекта и его строительстве.

3.23 **расчетные сочетания нагрузок:** Все возможные неблагоприятные комбинации нагрузок, которые необходимо учитывать при проектировании объекта.

3.24 **сейсмическая (инерционная) сила, сейсмическая нагрузка:** Сила (нагрузка), возникающая в массиве грунта при колебаниях основания во время землетрясения.

3.25 **сейсмический район:** Район с установленными и возможными очагами землетрясений, вызывающими на площадке строительства сейсмические воздействия интенсивностью 6 и более баллов.

3.26 **сейсмическое воздействие:** Движение грунта, вызванное природными или техногенными факторами (землетрясения, взрывы, движение транспорта, работа промышленного оборудования), обусловливающее движение, деформации, иногда разрушение сооружений и других объектов.

3.27 **сейсмическое микрорайонирование (СМР):** Оценка влияния свойств грунтов на сейсмические колебания в пределах площадей расположения конкретных сооружений и на территории населенных пунктов. Масштаб карт СМР – 1:50000 и крупнее.

3.28 **сейсмическое районирование (СР):** Картирование сейсмической опасности, основанное на выявлении зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ) и определении сейсмического эффекта, создаваемого ими на земной поверхности.

3.29 **сейсмичность площадки строительства:** Интенсивность расчетных сейсмических воздействий на площадке строительства с соответствующими периодами повторяемости за нормативный срок.

3.30 **сейсмичность территории:** Максимальная интенсивность сейсмических воздействий в баллах на рассматриваемой территории для принятого периода повторяемости землетрясения.

3.31 **скоростные характеристики грунта:** Скорости распространения сейсмических (продольных V_p и поперечных V_s) волн в грунтах оснований, измеряемые в м·с$^{-1}$.

3.32 **средние грунтовые условия:** Грунты категории II по сейсмическим свойствам.

4 Общие положения

4.1 Строительство автомобильных дорог в сейсмических районах на оползнеопасных территориях следует выполнять в соответствии с СП 14.13330 с учетом рекомендаций настоящего документа.

4.2 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.

4.3 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 плывунные или тиксотропные процессы в породах предрасположенных к их развитию, а также вытекание отмеченных пород со склонов и откосов.

4.4 Развитие крупных оползней вблизи зон тектонических нарушений вызвано:

- широким развитием зон смятия и дробления в коренных породах;
- интенсивной циркуляцией подземных вод;
- активной сейсмической деятельностью.

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

4.6 Сейсмическое воздействие наоползневой 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.

4.7 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.

4.8 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).

4.9 Оценка влияния сейсмического воздействия на устойчивость оползневых участков автомобильных дорог может быть выполнена различными методами, приведенными в разделе 5 в зависимости от уровня ответственности автомобильной дороги, сложности

инженерно-геологических условий участка и наличия необходимых исходных данных.

4.10 Состав и объем работ, выполняемых в рамках инженерных изысканий для оценки сейсмического воздействия на устойчивость склонов должны соответствовать требованиям СП 47.13330, [1÷4] и государственных стандартов по инженерным изысканиям и исследованиям грунтов для строительства. При этом в сейсмических районах инженерно-геологические изыскания должны включать в себя сейсмическое микрорайонирование (СМР) участка.

4.11 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).

4.12 В проектах строительства автомобильных дорог повышенного уровня ответственности (таблица 1) 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.

5 Расчеты устойчивости склона на сейсмическое воздействие

5.1 Общие указания

5.1.1 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, *а÷в*); расчеты местной устойчивости – отдельных морфологических элементов оползневого склона, нарушение устойчивости которых приводит к прекращению эксплуатации дороги (рисунок 2, *а÷б*);

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

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

5.1.3 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, *а÷в*; рисунок 2, *а÷б*).

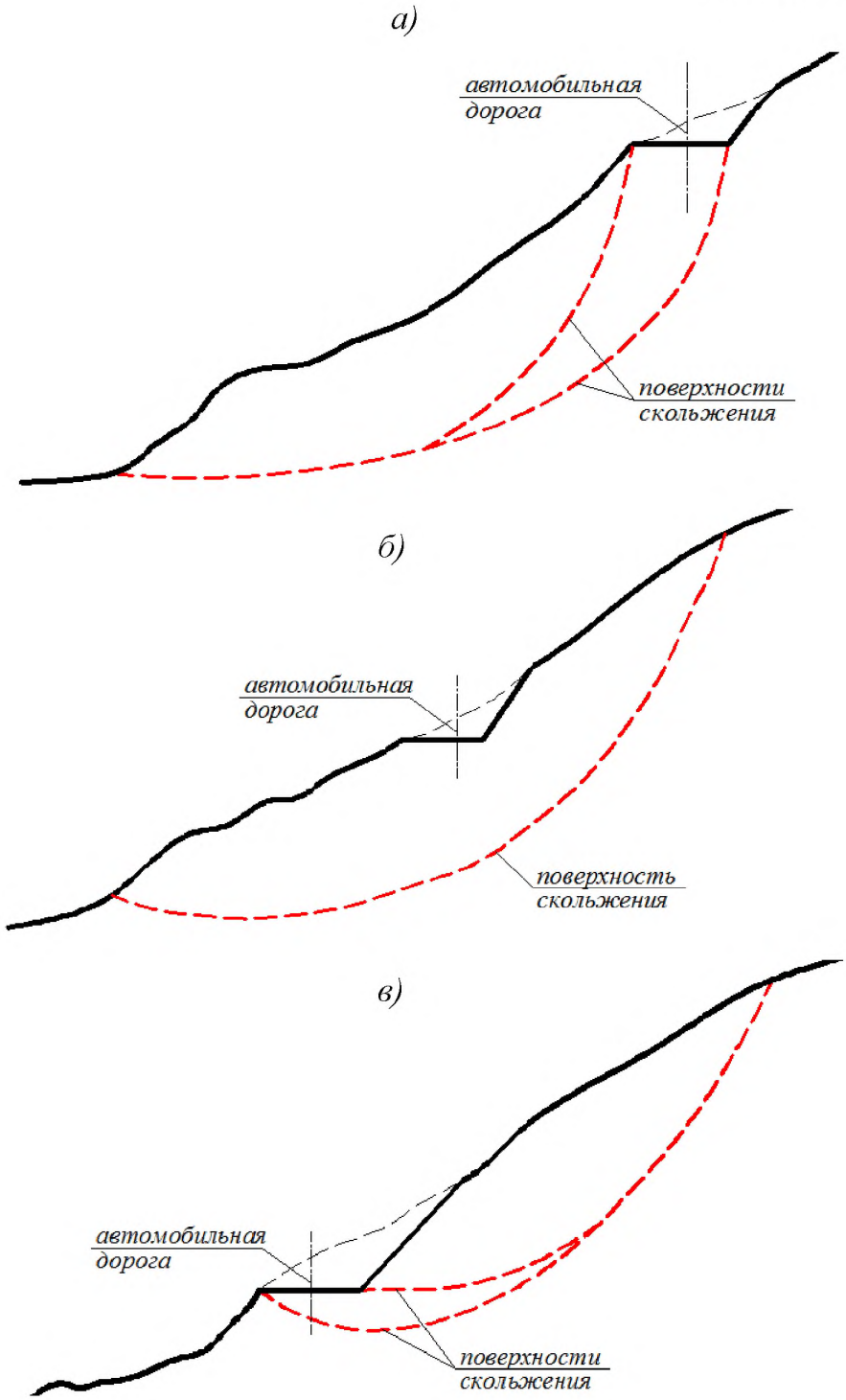


Рисунок 1 – Схемы взаимного расположения автомобильной дороги и оползнеопасногосклона (общая устойчивость склона)

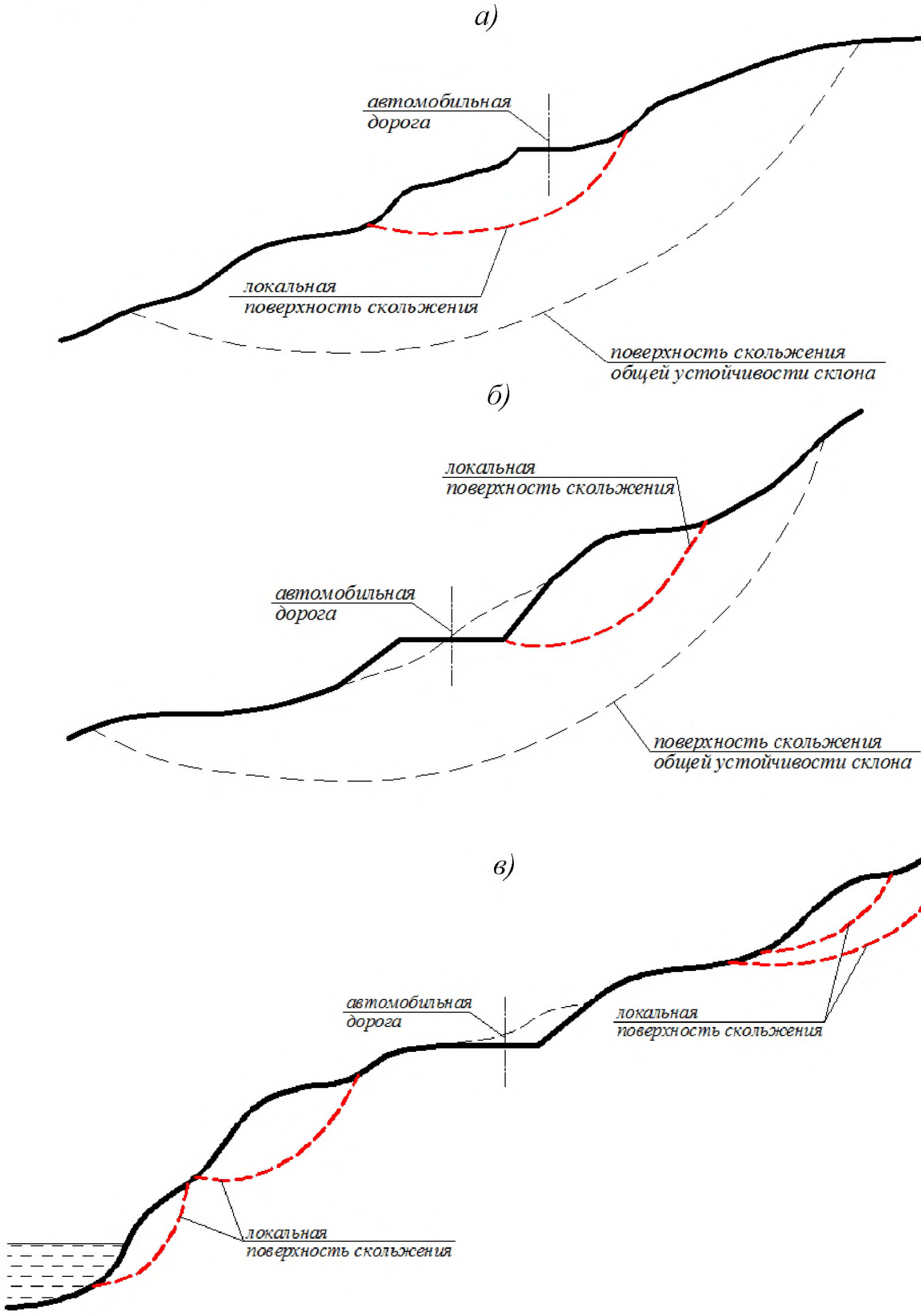


Рисунок 2 – Схемы взаимного расположения автомобильной дороги и оползнеопасногосклона (местная устойчивость)

5.2 Нагрузки и воздействия

5.2.1 Общие положения, сочетание нагрузок

5.2.1.1 В особое сочетание нагрузок включают постоянные P_d, длительные P_l, кратковременные P_t и особую P_sнагрузки:

$$C_S = P_d + (P_{l1} + P_{l1} + \ldots) + (P_{t1} + P_{t2} + \ldots) + P_S, \quad (1)$$

где C_s – нагрузка для особого сочетания.

5.2.1.2 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.

5.2.1.3 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 складируемого материала, равномерно распределенная нагрузка на территории;
- от подвижного состава железных дорог СК.

5.2.1.4 К кратковременным нагрузкам P_t следует относить:

- нагрузки от людей;
- нагрузки от транспортных средств типа НК;
- климатические (снеговые, гололедные) нагрузки.

5.2.1.5 К особым P_s нагрузкам следует относить сейсмические воздействия.

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

5.2.1.7 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).

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

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

5.2.1.10 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.

5.2.1.11 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.

5.2.2 Нормативные нагрузки от веса конструктивных элементов автомобильной дороги и грунтов

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

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

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

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

5.2.3 Нормативные нагрузки от автотранспортных средств и пешеходов

5.2.3.1 При расчете устойчивости оползнеопасных участков автомобильных дорог нормативная нагрузка от автотранспортных средств устанавливается в соответствии с ГОСТ Р32960 в виде нагрузки НК.

5.2.3.2 Нормативная нагрузка НК представлена в виде одиночной четырехосной тележки с нагрузкой на каждую ось 18 К (кН). Класс нагрузки К для расчетов устойчивости принимается равным 8,3.

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

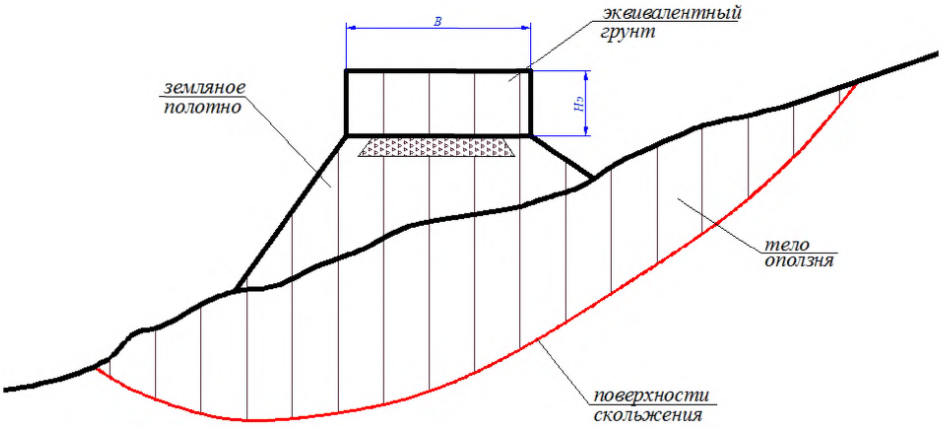


Рисунок 3 – Схема нагружения для расчета устойчивости оползнеопасных склонов

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

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

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

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

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

5.2.3.7 Интенсивность нормативной нагрузки от пешеходов на тротуарах (служебных проходах) и пешеходных мостах составляет 4 кН/м^2.

5.2.4 Расчетные сейсмические воздействия

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

5.2.4.2 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.

5.2.4.3 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 проектировщика. Рекомендуется при выборе карты пользоваться таблицей 1.

5.2.4.4 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.

5.2.4.5 Расчетную сейсмичность для всех оползнеопасных участков автомобильных дорогследует 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.

Таблица1 – Выбор карты ОСР-97 для целей оценки устойчивости склонов в зависимости от уровней ответственности и категории автомобильной дороги

<table>
<tr><th>Класс автомобильной дороги по ГОСТ Р 52398</th><th>Категория автомобильной дороги</th><th>Уровень ответственности</th><th>Карта общего сейсмического районирования</th></tr>
<tr><td>Автомагистраль</td><td>IA</td><td rowspan="4">Повышенный</td><td>В</td></tr>
<tr><td>Скоростная дорога</td><td>IБ</td><td rowspan="4">А</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Дорога обычного типа</td><td>IВ</td></tr>
<tr><td>II</td></tr>
<tr><td>III</td><td rowspan="2">Нормальный</td></tr>
<tr><td>IV</td></tr>
<tr><td></td><td>V</td><td>Пониженный</td><td>–</td></tr>
</table>

5.2.4.6 Микросейсморайонирование 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.

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

5.2.4.8 Число микрозон различной сейсмической опасности, выделяемых на участке строительства, определяют в зависимости от неоднородности строения исследуемой грунтовой толщи и изменчивости сейсмических свойств грунта.

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

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

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

5.2.4.12 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.

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

5.2.4.14 Сейсмичность площадки строительства объектов, использующих карту А, при отсутствии данных СМР допускается предварительно определять в зависимости от грунтовых условий по таблице 2 и рекомендаций пункта 5.2.4.16.

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

5.2.4.16 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 местности 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.

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

5.2.4.18 Расчетные сейсмические воздействия при применении динамической теории должны задаваться расчетнымиакселерограммами, 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 сейсмотектоническим, геологическим и другим сейсмологическим условиям;

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

5.2.4.19 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 см/с^2 – ускорения; 8,0 см/с – скорости; 4,0 см – перемещения;

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

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

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

5.2.4.20 Для автомагистралей (таблица 1) с целью определения силы максимального землетрясения по комплексу геологических, геофизических и геохимических данных составляют карты опасных сейсмогенерирующих структур в радиусе 100 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.

5.2.4.21 При выполнении геофизических исследований для обеспечения строительства объекта особой сейсмостойкости, 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.

Т а б л и ц а 2 – Расчетная сейсмичность площадки строительства

Категория грунта по сейсмическим свойствам	Описание грунта	Характеристика сейсмических свойств грунтов			Расчетная сейсмичность площадки при сейсмичности района, баллы			
		Сейсмическая жесткость $\rho \cdot V_s$, г/см^3·м/с	Скорость поперечных волн V_s, м/с	Отношение скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s	6	7	8	9
I	- скальные грунты (в том числе вечномерзлые и вечномерзлые оттаявшие) невыветрелые и слабовыветрелые; - крупнообломочные грунты плотные, маловлажные из магматических пород, содержащие до 30 % песчано-глинистого заполнителя; - выветрелые и сильновыветрелые скальные и дисперсные твердомерзлые (многолетнемерзлые) грунты при температуре минус 2 °С и ниже при строительстве и эксплуатации по принципу I (сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии)	> 1500	> 700	1,7÷2,2	-	6	7	8
II	- скальные грунты выветрелые и сильновыветрелые, в том числе вечномерзлые, кроме отнесенных к категории I; - крупнообломочные грунты, за исключением отнесенных к категории I; - пески гравелистые, крупные и средней крупности плотные и средней плотности маловлажные и влажные; - пески мелкие и пылеватые плотные и средней плотности маловлажные; - глинистые грунты с показателем консистенции $I_L \leq 0,5$ прикоэффициенте пористости $e < 0,9$ для глин и суглинков и $e < 0,7$ – для супесей; - вечномерзлые нескальные грунты пластичномерзлые или сыпучемерзлые, а также твердо-мерзлые при температуре выше минус 2 °С при строительстве и эксплуатации по принципу I	350÷1500	250÷700	1,7÷2,2 (не водонасыщенные) 2,2÷3,5 (водонасыщенные)	-	7	8	9

Окончание таблицы 2

III	- пески рыхлые независимо от степени влажности и крупности; - пески гравелистые, крупные и средней крупности, плотные и средней плотности водонасыщенные; - пески мелкие и пылеватые плотные и средней плотности влажные и водонасыщенные; - глинистые грунты с показателем консистенции $I_L > 0,5$; - глинистые грунты с показателем консистенции $I_L \leq 0,5$ при коэффициенте пористости $e \geq 0,9$ для глин и суглинков и $e \geq 0,7$ – для супесей; - вечномерзлые дисперсные грунты при строительстве и эксплуатации по принципу II (допускается оттаивание грунтов основания)	200÷350	150÷250	3,5÷7	7	8	9	> 9
IV	- наиболее динамически неустойчивые разновидности песчано-глинистых грунтов, указанные в категории III, склонные к разжижению при сейсмических воздействиях	< 200	60÷150	7÷15	7*	8*	9*	> 9*

* Грунты с большей вероятностью склонны к разжижению и потере несущей способности при землетрясениях интенсивностью более 6 баллов.

Примечания

1 Скорости V_p и V_s, а также значение сейсмической жесткости грунта являются средневзвешенными значениями для 30-метровой толщи, считая от планировочной отметки.

2 В случае многослойного строения грунтовой толщи, грунтовые условия участка относят к более неблагоприятной категории, если в пределах верхней 30-метровой толщи (считая от планировочной отметки) слои, относящиеся к этой категории, имеют суммарную мощность более 10 м.

3 При отсутствии данных о консистенции, влажности, сейсмической жесткости, скоростях V_p и V_s глинистые и песчаные грунты при положении уровня грунтовых вод выше 5 м относятся к категории III или IV по сейсмическим свойствам.

4 При прогнозировании подъема уровня грунтовых вод и обводнения грунтов (в том числе просадочных) категорию грунтов следует определять в зависимости от свойств грунта в замоченном состоянии.

5 При строительстве на вечномерзлых грунтах по принципу II грунты основания следует рассматривать по их фактическому состоянию после оттаивания.

6 При выполнении специальных инженерных мероприятий по укреплению грунтов оползневого массива категория грунта по сейсмическим свойствам должна быть определена по результатам СМР.

5.3 Характеристики грунтов

5.3.1 В качестве основных параметров механических свойств грунтов следует устанавливать нормативные и расчетные значения прочностных, деформационных и других физико-механических характеристик, определяемых на основе данных инженерно-геологических изысканий участка строительства.

5.3.2 Нормативные значения характеристик грунта следует принимать равными их математическим ожиданиям, полученным по результатам обработки результатов испытаний, если не оговорены иные условия, определяющие их значения.

5.3.3 Возможные отклонения в неблагоприятную сторону прочностных и других характеристик грунтов от их нормативных значений следует учитывать коэффициентами надежности по грунту.

5.3.4 Расчетные значения характеристик грунтов определяют делением нормативного значения этих характеристик на коэффициент надежности по грунту:

$$X = \frac{X_n}{\gamma_g}, \qquad (3)$$

где X_n – нормативное значение данной характеристики;

γ_g – коэффициент надежности по грунту.

5.3.5 Коэффициент надежности по грунту при вычислении расчетных значений прочностных характеристик φ и c, а также плотности грунта ρ устанавливают в зависимости от изменчивости этих характеристик, числа определений и значения доверительной вероятности α (ГОСТ 20522).

5.3.6 Основными параметрами механических свойств грунтов, определяющими устойчивость оползневых склонов и их деформации, являются прочностные и деформационные характеристики грунтов (угол внутреннего трения φ, удельное сцепление c, предел прочности на одноосное

сжатие скальных грунтов R_c, модуль деформации E и коэффициент поперечной деформации грунтовν).

5.3.7 Для определения прочностных характеристик φ и c грунтов, для которых прогнозируется повышение влажности, образцы грунтов предварительно насыщают водой до значений влажности, соответствующих прогнозу.

5.3.8 Прочностные характеристики дисперсных грунтов φ и c могут быть получены путем испытаний грунтов лабораторными методами на срез или трехосное сжатие (ГОСТ 12248). В полевых условиях значения φ и c могут быть получены испытаниями на срез целиков грунта в шурфах или котлованах (ГОСТ 20276).

5.3.9 Для предварительных расчетов устойчивости склонов при отсутствии сформировавшейся поверхности скольжения допускается определять нормативные и расчетные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов по таблицам СП 22.13330 в зависимости от их физических характеристик. Для отдельных районов допускается пользоваться региональными таблицами характеристик грунтов, специфических для этих районов, приведенными в территориальных строительных нормах.

5.3.10 Динамические характеристики грунтов рекомендуется использовать для автомобильных дорог Iкатегории. При этом динамические испытания в соответствии с [5]могут не проводиться, если расчетные динамические нагрузки не превышают статические более чем на 5 %.

5.3.11 Характер динамических нагрузок, режимы испытаний грунтов задаются в задании заказчика и применяются при проведении лабораторных испытаний. Заданные режимы испытаний должны соответствовать реальным условиям статического и динамического нагружения грунта с учетом глубины его залегания.

5.3.12 В программе лабораторных испытаний для каждого инженерно-геологического элемента должны быть указаны режимы нагружения, полученные в результате предварительных расчетов напряженного состояния грунта в массиве основания от действия статических и динамических нагрузок.

5.3.13 По каждому инженерно-геологическому элементу, определенному программой работ, проводится не менее трех динамических испытаний.

5.3.14 Динамические испытания грунтов проводятся на специальных приборах, позволяющих передавать на исследуемые образцы грунта наряду со статическими нагрузками – динамические нагрузки, изменяющиеся по частоте и амплитуде. Прочностные и деформационные свойства грунтов в условиях динамического нагружения определяются в стабилометрах в условиях трехосного сжатия с динамическим характером нагружения. Деформационные свойства грунтов в условиях динамического нагружения допускается определять в одометрах.

5.3.15 Определение прочностных свойств грунтов при действии динамических нагрузок проводится по консолидированно-недренированной (закрытой) схеме с контролем давления поровой воды, позволяющим определить эффективное напряжение.

5.3.16 Определение величин прочностных и деформационных характеристик грунтов с учетом динамических нагрузок проводится в соответствии с действующими нормативными документами. При расчете характеристик действующая на образец нагрузка принимается как сумма статической нагрузки и амплитуды динамической нагрузки.

5.3.17 По результатам испытаний определяются величины динамических коэффициентов как отношение расчетных характеристик, полученных в условиях статического нагружения, к таким же характеристикам, полученным в условиях динамического нагружения.

5.3.18 В случаях отсутствия соответствующих экспериментальных данных допускается применять корреляционные связи между значениями

статического модуля общей деформации E_0 (или статического модуля упругости E_{st}) и динамического модуля упругости E_{dyn} определяемого геофизическими методами. Допускается также применение статических прочностных характеристик материалов сооружения и грунтов основания; при этом следует вводить дополнительные коэффициенты условий работы, для учета влияния на эти характеристики кратковременных динамических воздействий.

5.3.19 При наличии в оползневом теле водонасыщенных несвязных или слабосвязных грунтов следует учитывать влияние возможности разжижения грунтов, локальных разуплотнений и разрушений грунта в результате сейсмических воздействий.

5.3.20 Для оценки способности грунта к разжижению используют метод экспериментального определения пороговых, или критических ускорений колебаний, который основан на выполнении требования:

$$\alpha_{действ} \leq \eta_{кр}, \qquad (4)$$

где $\alpha_{действ}$ – максимальное действующее ускорение колебаний;

$\eta_{кр}$ – критическое ускорение колебаний.

5.3.21 Критическое ускорение колебаний является природным свойством грунта и определяется по результатам испытаний грунта на вибростоле как ускорение, при котором не возникает дополнительных поровых давлений или деформаций грунта. При выполнении указанного условия дальнейшие исследования динамической устойчивости грунта не требуются. Для более точной оценки опасности разжижения используются экспериментальные методы определения устойчивости грунта в динамических приборах трехосного сжатия, в условиях природного напряженно-деформированного состояния и его изменения при пульсациях давления, моделирующих динамические воздействия. Прибор позволяет создать различные комбинации осевых и объемных нагрузок при заданных условиях дренирования. В процессе лабораторных динамических

исследований на разжижение следует определять: критический порог, свидетельствующий о начале разжижения грунта – достижение относительной осевой деформации образца 5 %; критическая относительная амплитуда воздействий (динамической нагрузки) – величина относительной амплитуды напряжения при превышении которой образец выдерживает менее 10000 циклов нагрузки.

5.3.22 Подробное изложение методики динамических испытаний грунтов содержится в [7].

5.4 Расчетные положения

5.4.1 В общем случае расчеты устойчивости выполняются при произвольных формах поверхности скольжения. Возможные поверхности скольжения, отделяющие сдвигаемый массив грунта от неподвижного, могут быть приняты круглоцилиндрическими, ломаными, в виде логарифмической спирали и другой формы.Возможные поверхности скольжения могут полностью или частично совпадать с выраженными ослабленными поверхностями в грунтовом массиве или пересекать слои слабых грунтов. Коэффициент устойчивости склона находят как минимальное значение k_{st} по всем возможным поверхностям скольжения.

5.4.2 Для обеспечения безопасной эксплуатации автомобильной дороги устойчивость оползнеопасных естественных и искусственных склонов должна удовлетворять следующему условию:

$$k_{st} \geq [k_{st}], \qquad (5)$$

где k_{st} – расчетное значение коэффициента устойчивости склона;

$[k_{st}]$ – нормированное значение коэффициента устойчивости склона.

5.4.3 Определение расчетного значения коэффициента устойчивости склона может производиться как с использованием традиционных методов теории предельного равновесия (с разбиением оползневого массива на отсеки), так и упругопластическими расчетами численными методами с использованием метода снижения прочностных характеристик.

Псевдостатический метод расчета устойчивости склона, основанный на отсековой модели оползневого склона и описанный в разделе 5.5 рекомендуется для большинства встречающихся на практике случаев.Метод поворота склона, представленный в разделе 5.6 – допускается для оценки устойчивости наиболее простых по геологическому строению и морфологии склонов. Динамический метод, основанный на методе конечных элементов, описанный в разделе 5.7 – рекомендуется для наиболее сложных оползнеопасных участков и при наличии необходимых исходных данных в виде акселерограмм для рассматриваемого района строительства.

При определении расчетного значения коэффициента устойчивости рекомендуется учитывать тип оползня и характер поверхности скольжения.

5.4.4 Нормированное значение коэффициента устойчивости склона согласно СП 116.13330 определяется по формуле:

$$[k_{st}] = \frac{\gamma_n \cdot \psi}{\gamma_d}, \qquad (6)$$

где γ_n – коэффициент надежности по ответственности автомобильной дороги;

ψ – коэффициент сочетания нагрузок;

γ_d – коэффициент условий работы.

При предварительных расчетах с использованием табличных данных (5.3.9) нормированное значение коэффициента устойчивости следует повышать не менее чем на 10 % по сравнению с величиной, полученной по формуле (6).

5.4.5 Коэффициент надежности по ответственности автомобильной дороги устанавливается в зависимости от класса и категории автомобильной дороги (или уровня ответственности), согласно ГОСТ Р 27751, ГОСТ Р 52398 и СП 14.13330 и принимается по таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициента надежности по ответственности для расчетов устойчивости оползнеопасных склонов

Класс автомобильной дороги по ГОСТ Р 52398	Категория автомобильной дороги	Уровень ответственности	Коэффициент надежности по ответственности γ_n
Автомагистраль	IA	Повышенный	1,25
Скоростная дорога	IБ		1,20
Дорога обычного типа	IB		
	II		
	III	Нормальный	1,15
	IV		
	V	Пониженный	1,10

Класс, категория и уровень ответственности автомобильной дороги, устанавливаются генпроектировщиком по согласованию с заказчиком в задании на проектирование или в специальных технических условиях (СТУ).

При расчетах устойчивости склонов, сохраняемых в естественном состоянии или проектируемых откосов, γ_n принимается как для автомобильной дороги, которая может перейти в непригодное состояние при разрушении склона.

При расчетах природных склонов следует принимать γ_n=1,0 (например, при выполнении обратных расчетов с учетом сейсмической нагрузки).

5.4.6 Коэффициент сочетания нагрузок, при расчетах устойчивости оползнеопасных склонов для особого сочетания (с учетом сейсмического воздействия) принимают:

- при сейсмической нагрузке на уровне проектного землетрясения (ПЗ) $\psi = 0,95$;
- при сейсмической нагрузке максимального уровня землетрясения (МРЗ) $\psi = 0,90$.

5.4.7 Коэффициент условий работы вводится для учета следующих факторов:

- динамический характер воздействий;

- возможность изменения свойств материалов со временем;
- степень точности исходных данных;
- приближенность расчетных схем и метода расчета устойчивости;
- вид грунтов, слагающих склон и другие факторы.

Значения коэффициента устанавливается в диапазоне $0{,}90 \leq \gamma_d \leq 1{,}00$ на усмотрение организации, выполняющей расчет устойчивости склона на основе экспериментальных и теоретических данных, а также опыта подобных работ.

5.4.8 Сейсмическое воздействие вызывает ускорения и силы инерции в грунтовом массиве и конструктивных элементах автомобильной дороги, и, соответственно относится к динамическим воздействиям.

5.4.9 Для оценки реакции элементов автомобильной дороги и грунтов оползнеопасного склона при динамических воздействиях необходимо использовать соответствующие динамические модели. В этом случае параметры напряженно-деформированного состояния определяют в результате динамического расчета. Динамические воздействия допускается приводить к эквивалентным статическим нагрузкам, учитывающим возникающие в сооружениях силы инерции.

5.4.10 Расчетные схемы оползнеопасных склонов должны отражать действительные условия их работы и соответствовать рассматриваемой расчетной ситуации.

5.4.11 Расчетная схема включает в себя:

- расчетные модели нагрузок и воздействий;
- расчетные модели, описывающие напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов автомобильной дороги, оснований и оползневого массива;
- расчетные модели сопротивления.

5.4.12 Расчетные модели нагрузок должны включать в себя их интенсивность (величину), место приложения, направление и

продолжительность действия. Для динамических воздействий, кроме того, должны быть заданы характерные частоты и, при необходимости, фазовые углы и спектральные характеристики (энергетический спектр, авто- и взаимные корреляционные функции).

5.4.13 Расчетные модели напряженно-деформированного состояния должны включать в себя определяющие соотношения, описывающие:

- реакцию сооружений (при их наличии) и их конструктивных элементов при динамических и статических нагрузках;
- условия взаимодействия конструктивных элементов между собой и с основанием.

При этом должны быть установлены:

- упругие или неупругие характеристики конструктивных элементов и основания;
- параметры, характеризующие геометрически линейную или нелинейную работу конструкций;
- физические и реологические свойства, эффекты деградации.

5.4.14 Расчетная схема должна выбираться с учетом наиболее существенных факторов, определяющих устойчивость склона (особенности геологического строения и свойств грунтов основания, возможности их изменения в процессе строительства и эксплуатации автомобильной дороги и т. д.). В необходимых случаях и при наличии соответствующих данных рекомендуется учитывать анизотропию, пластические и реологические свойства грунтов.

5.4.15 Инженерно-геологическая модель (схема) склона должна представлять собой совокупность ИГЭ, каждый из которых должен быть охарактеризован инженерно-геологическими и гидрогеологическими признаками и наделен постоянными во всех направлениях нормативными и расчетными значениями физико-механических показателей грунтов.

5.5 Псевдостатический метод

5.5.1 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.

5.5.2 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 $k_{st} < 1$).

5.5.3 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.

5.5.4 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÷6 м.

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

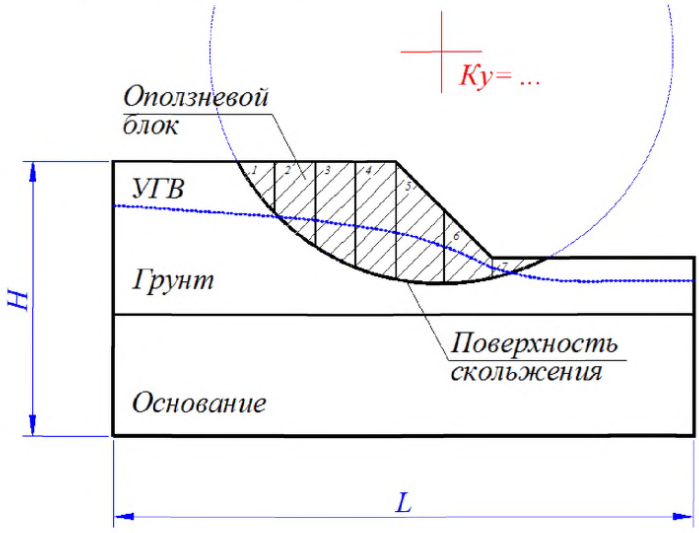


Рисунок 4 – Разбивка оползневого блока на отсеки

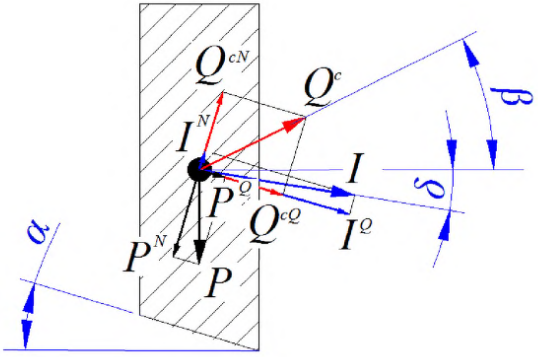


Рисунок 5 – Схема сил, действующих в отсеке

5.5.6 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 вертикальной 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).

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

5.5.8 Величина результирующей сейсмической силы принимается равной произведению веса отсека на коэффициент сейсмичностиμ:

$$Q_i^c = \mu \cdot p_i , \qquad (7)$$

где μ – коэффициент сейсмичности;

p_i– вес отсека.

5.5.9 Значения коэффициента μ при расчете естественных склонов определяются по таблице 4 в зависимости от расчетной сейсмичности участка, а при расчете искусственных откосов (насыпи дорог) значения коэффициента из таблицы 4 следует (приближенно) увеличивать в 1,5 раза.

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

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

$$k_{st} = \frac{\sum p_i(\cos\alpha_i - \mu\sin\alpha_i)\cdot tg\varphi_i + \sum c_i l_i \cdot 1\text{м} + \sum p_i \sin\alpha_i''}{\sum p_i \sin\alpha_i' + \sum p_i \mu\cos\alpha_i}, \quad (8)$$

где p_i–вес i-го расчетного отсека, ограниченного вертикальными гранями, кН;

α_i – угол наклона подошвы отсека, град;

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

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

l_i – длина подошвы отсека, м;

φ_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

$$p_i = S_i\gamma_i \cdot 1\text{м}, \quad (9)$$

где S_i–площадь сечения отсека, $м^2$;

γ_i – средний удельный вес в пределах отсека, кН/$м^3$.

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

2 Величины α'_i и α''_i принимаются положительными; величины α_i при уклоне подошвы отсека в сторону падения уступа считаются положительными, при обратном уклоне – отрицательными.

5.5.12 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 4 – Значения коэффициента сейсмичности

Расчетная сейсмичность в баллах	7	8	9
Коэффициент сейсмичности μ	0,025	0,050	0,100

5.5.13 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:

$$k_{st} = \frac{\sum\left[p_i'\cos\alpha_i + \gamma_в S_i^в I_i \sin\left(\beta_i - \alpha_i\right)\cdot 1м - p_i \mu \sin\alpha_i \right]\cdot tg\varphi_i + \sum c_i l_i \cdot 1м + \sum p_i'\sin\alpha''_i}{\sum p_i'\sin\alpha'_i + \sum \gamma_в S_i^в I_i \cos\left(\beta_i - \alpha_i\right)\cdot 1м + \sum p_i \mu \cos\alpha_i}, \quad (10)$$

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

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

μ – коэффициент сейсмичности;

$\gamma_в$ – удельный вес воды, равный 10 кН/м^3;

$S^в_i$ – площадь сечения обводненной части отсека, м^2;

I_i – гидравлический градиент в пределах отсека;

α_i – угол наклона подошвы отсека, град (величина α_i при уклоне подошвы отсека в сторону падения уступа принимается положительной, при обратном уклоне – отрицательной);

β_i – угол наклона равнодействующей фильтрационного давления, град (величины β_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 $S^e_i = 0$.

5.5.14 Пример расчета оползнеопасного склона по приведенному методу представлен в приложении А.

5.5.15 При круглоцилиндрической поверхности скольжения кроме вышеуказанного метода сил может быть использован метод моментов, в котором рассматривается вращение оползающего массива вокруг центра O (рисунок 6).

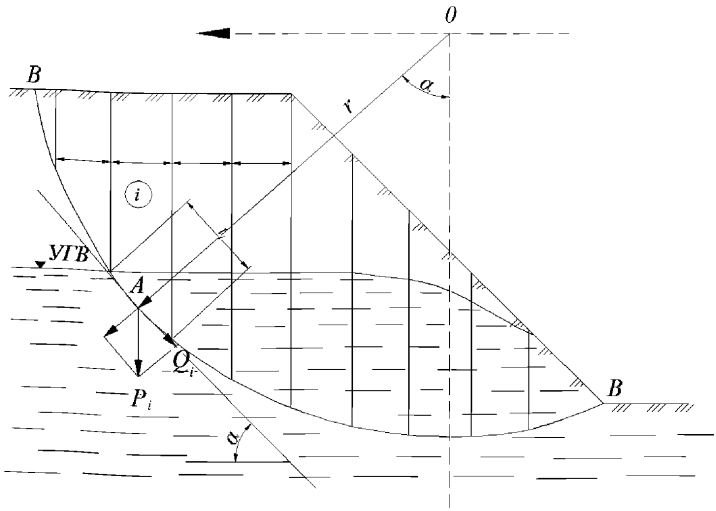


Рисунок 6 – Схема оползневого массива для метода моментов

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

5.5.17 Расчетное значение коэффициента устойчивости при этом определяется как отношение суммы моментов $M_{уд}$ удерживающих массив к сумме моментов $M_{вр}$ вращающих массив:

$$k_{st} = \frac{\sum M_{уд}}{\sum M_{вр}}. \qquad (11)$$

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.

5.5.18 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, описанный в [8].

5.5.19 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.

5.5.20 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.

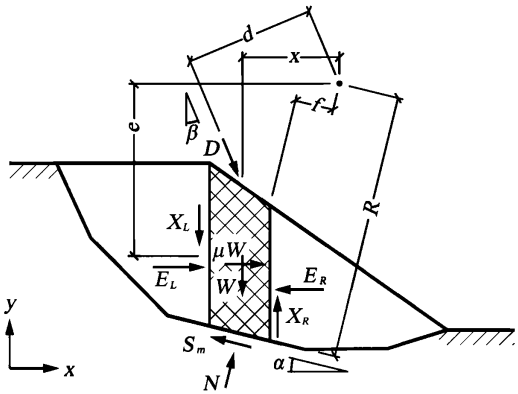


Рисунок 7–Расчетная схема метода равновесия сил и моментов

5.5.21 Коэффициент устойчивости из условия равновесия сил определяется по формуле:

$$k_{st}^{f} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[c_i l_i + \left(N_i - u_i l_i\right)\mathrm{tg}\varphi_i\right]\cos\alpha_i}{\sum_{i=1}^{n} N_i \sin\alpha_i + \mu_h \sum_{i=1}^{n} W_i + \sum_{i=1}^{n} D_i \sin\beta_i}; \qquad (12)$$

коэффициент устойчивости из условия равновесия моментов сил:

$$k_{st}^{m} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[c_i l_i + \left(N_i - u_i l_i\right)\mathrm{tg}\varphi_i\right]R_i}{\sum_{i=1}^{n} N_i f_i + \sum_{i=1}^{n} W_i x_i + \mu_v \sum_{i=1}^{n} W_i x_i + \mu_h \sum_{i=1}^{n} W_i e_i + \sum_{i=1}^{n} D_i d_i}; \qquad (13)$$

сила нормальной реакции в основании отсеков:

$$N_i = \frac{W_i + \mu_v W_i - \left(X_i^R - X_i^L\right) + \frac{u_i \operatorname{tg}\varphi_i - c_i}{F_j} l_i \sin\alpha_i + D_i \cos\beta_i}{\cos\alpha_i + \frac{\sin\alpha_i \operatorname{tg}\varphi_i}{K_{f(m)}}}; \quad (14)$$

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

$$N_i^{упр} = W_i \cos\alpha_i + \mu_v W_i \cos\alpha_i - \mu_h W_i \sin\alpha_i + D_i \cos\left(\alpha_i + \beta_i\right); \quad (15)$$

касательная межотсековая сила по граням отсеков:

$$X = E \cdot \lambda \cdot f\left(x\right); \quad (16)$$

нормальная межотсековая сила по граням отсеков:

$$E_i^R = E_i^L + N_i \left(\sin\alpha_i - \frac{\operatorname{tg}\varphi_i \cos\alpha_i}{K_{f(m)}} \right) + \frac{u_i \operatorname{tg}\varphi_i - c_i}{K_{f(m)}} l_i \cos\alpha_i + \mu_h W_i + D_i \sin\beta_i , \quad (17)$$

где i –номер рассматриваемого отсека;

n – общее количество отсеков;

α – угол наклона основания отсека к горизонту, град;

l – длина основания отсека, м;

c – удельное сцепление в грунте в основании отсека, кПа;

φ – 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;

μ – 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;

β – угол наклона результирующей внешней нагрузки D, град;

λ – коэффициентмежотсековой 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.

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

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

$$x_{rel} = \frac{x - x_0}{x_n - x_0}, \tag{18}$$

где x – координата расчетного сечения, м;

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

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

5.5.24 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.

5.5.25 Допускается использовать иные общепринятые методы расчета коэффициента устойчивости склона с псевдостатическим заданием сейсмического воздействия, описанные,например, в [4],[8] и др. источниках.

5.6 Метод поворота склона

5.6.1 К инженерным методам расчета устойчивости оползневых склонов на основании псевдостатического подхода к заданию сейсмического воздействия кроме непосредственно псевдостатическогометода, рассмотренного в разделе 5.5 относится так называемый метод поворота склона или метод Чугаева Р. Р.

5.6.2 Для учета сейсмического воздействия по методу Чугаева Р. Р. рассчитываемый оползневой блок целиком поворачивают на угол отклонения результирующей объемной силы (равной равнодействующей веса отсека и силы сейсмического воздействия) от вертикали. При этом результирующая объемная сила становится вертикальной. То есть поверхность склона *DC* (рисунок 8) вместе с заданной дугой обрушения *AB* (и границами *ab*,*cd*и т. д., разделяющими инженерно-геологические элементы, если таковые границы в пределах оползневого блока имеются) необходимо повернуть относительно точки*C*на величину сейсмического угла θ_c.

5.6.3 Величина сейсмического угла для данного метода определяется из соотношения:

$$tg\theta_c = 1{,}5\mu, \tag{19}$$

где μ – коэффициент сейсмичности, определяемый по таблице 4 в зависимости от расчетной сейсмичности участка.

В соответствии с приведенной формулой значения сейсмического угла вычислены и сведены в таблицу 5.

5.6.4 Найденную для фиктивного блока обрушения величину k_{st}принимаем как коэффициент запаса устойчивости заданного действительного блока обрушения *ABCD*, подверженного действию сейсмических сил.

5.6.5 Если на поверхность отсека действуют какие-либо сосредоточенные или поверхностные силы, то при осуществлении поворота склона следует соответствующим образом поворачивать (относительно точки *C*) линии действия этих сил.

Т а б л и ц а 5 – Значения сейсмического угла для метода Чугаева Р. Р.

Расчетная сейсмичность в баллах	7	8	9
Сейсмический угол θ_c	2	4	8

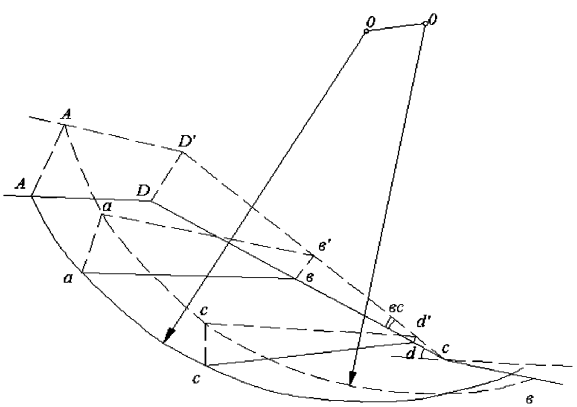


Рисунок 8 – Схема поворота оползневого склона (при отсутствии грунтовых вод)

5.6.6 В случае сыпучего «сухого» грунта ($c = 0$), подвергающегося действию сейсмических сил, расчетный коэффициент устойчивости нормального свободного склона определяется по формуле:

$$k_{st} = \frac{tg\varphi}{tg(\theta + \theta_c)}. \qquad (20)$$

5.6.7 При расчете склона, насыщенного на некоторую высоту покоящейся или движущейся водой по обычным правилам гидростатики, определяются величины и линии действия сил гидростатического давления, действующего на поверхность рассматриваемого отсека обрушения, омываемую водой бьефа (см. на рисунке 9 силы $P_в$ и $G_в$ и линии их действия B_I–B_I и B_{II}–B_{II}).

5.6.8 Далее осуществляют поворот заданного склона *ADCBE* относительно точки *C* на угол θ_c в зависимости от расчетной сейсмичности; при этом поворачивают на угол θ_c также: заданную дугу сдвига, кривую депрессии (свободную поверхность грунтовых вод) и линии действия сил гидростатического давления, действующего на поверхность отсека обрушения со стороны воды бьефа (см. линии B_I –B_I и B_{II} –B_{II}).

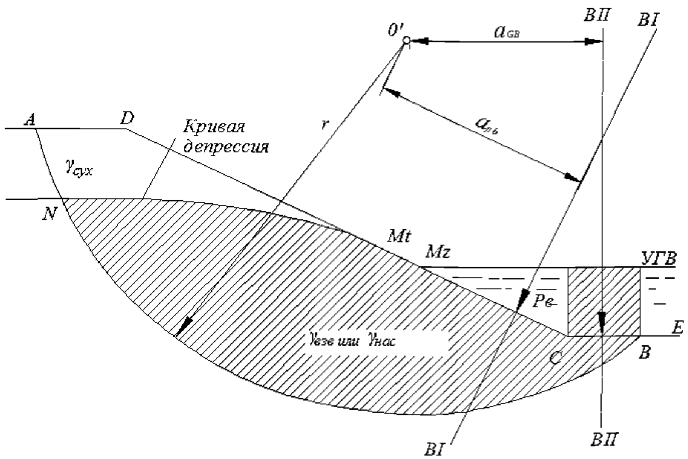


Рисунок 9 – Расчетная схема оползневого склона насыщенного водой

5.6.9 Для фиктивного блока обрушения $A'D'CB'A'$ (см. рисунок 10), определяют коэффициент устойчивости в предположении, что сейсмические силы отсутствуют по формуле 11.

При этом удерживающий момент следует определять по формуле:

$$M_{уд} = r\left[G_{сух} + G_{взв}\right] \cdot tg\varphi + rL_S c. \qquad (21)$$

Сдвигающий момент следует определять по формуле:

$$M_{сдв} = M_{G_{сух}} + M_{G_{нас}} - M_{P_B} - M_{G_B}. \qquad (22)$$

где r – радиус дуги сдвига;

L_s – длина дуги сдвига;

$G_{сух}$ – собственный вес «сухого» грунта, расположенного над свободной поверхностью грунтовых вод (в пределах отсека обрушения), вычисляемый исходя из удельного веса грунта $\gamma_{сух}$;

$G_{взв}$ – собственный вес взвешенного грунта, расположенного ниже свободной поверхности грунтовых вод (см. область отсека обрушения,

покрытую на рисунке 10 штриховкой), исчисляемый исходя из объемного веса грунта $\gamma_{взв}$ во взвешенном состоянии;

$M_{Gсух}$ – момент силы $G_{сух}$ относительно нового центра O';

$M_{Gвзв}$ – момент относительно центра O' силы $G_{нас}$, где $G_{нас}$ – собственный вес насыщенного грунта, расположенного ниже свободной поверхности грунтовых вод (см. область отсека обрушения, покрытую на рисунке 10 штриховкой), исчисляемый исходя из объемного веса грунта $\gamma_н$ насыщенного водой;

$M_{Pв}$и $M_{Gв}$– моменты относительно центра O' сил $P_в$и$G_в$.

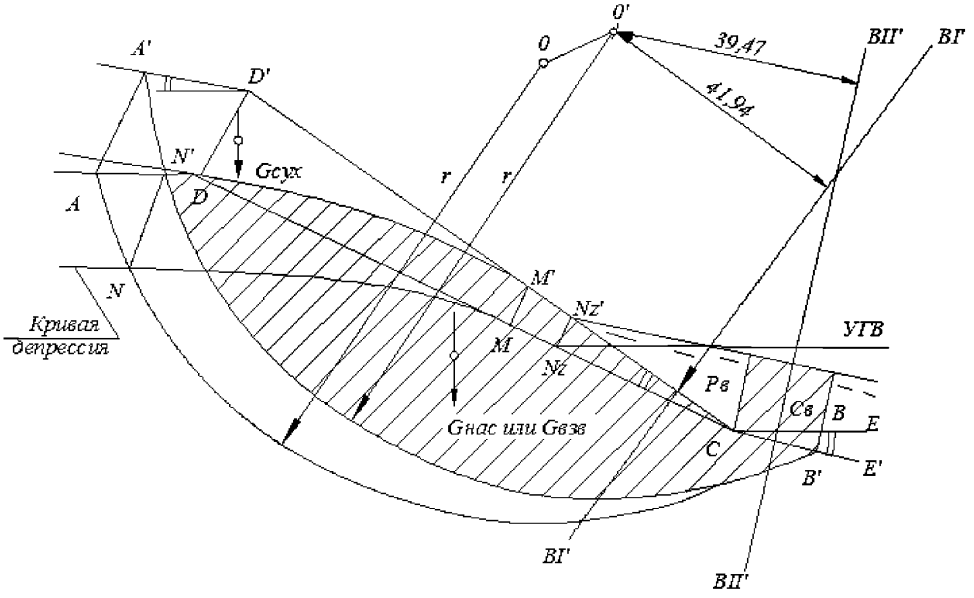


Рисунок 10 – Схема поворота оползневого склона насыщенного водой

5.6.10 Коэффициент устойчивости k_{sl}, найденный для фиктивного блока обрушения, принимаем для действительного блока обрушения *ABCD*, подверженного действию сейсмических сил.

5.7 Динамический метод

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

5.7.2 Расчет устойчивости оползнеопасного склона динамическим методом выполняется на основе акселерограмм (рисунок 11) с учетом продолжительности и интенсивности землетрясения. Изменения ускорения во времени могут быть заданы в горизонтальном и вертикальном направлении.

5.7.3 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.

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

$$[K]\{d\}+[D]\{v\}+[M]\{a\}=\{F\}, \qquad (23)$$

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.

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

5.7.6 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.

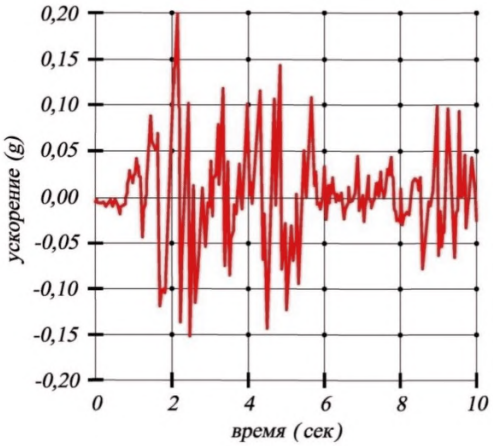


Рисунок 11 – Пример акселерограммы

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

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

5.7.9 Вектор нагрузок может быть составлен из различных сил:

$$\{F\}=\{F_b\}+\{F_S\}+\{F_n\}+\{F_g\}, \tag{24}$$

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

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

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

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

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

Матрица распределенных масс:

$$[M]=\int_v \rho[\psi]dv, \tag{25}$$

Матрица сосредоточенных масс:

$$[M]=\int_v \rho\langle N\rangle^T\langle N\rangle dv, \tag{26}$$

где ρ – сосредоточенная (массовая) плотность;

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

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

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

$$[D]=\alpha[M]+\beta[K], \tag{27}$$

где α и β – скаляры, названные Рэлеевскими коэффициентами демпфирования. Они связаны с коэффициентом демпфирования η следующей формулой:

$$\eta=\frac{\alpha+\beta\omega^2}{2\omega}, \tag{28}$$

где ω – частота колебаний.

5.7.12 Матрица жесткости определяется следующим образом:

$$[K]=\int_{v}[B]^{T}[C]\cdot[B]dv, \tag{29}$$

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

$[C]$ – матрица упругости.

5.7.13 Вектор деформаций определяется из следующего выражения:

$$\{\varepsilon\}=[B]\begin{Bmatrix}u\\v\end{Bmatrix}, \tag{30}$$

где $[B]$ – матрица деформаций;

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

Вектор деформации также определяется составляющими:

$$\{\varepsilon\}=\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix}. \tag{31}$$

5.7.14 Для задачи плоской деформации ε_z равен нулю, и матрица деформаций имеет вид:

$$[B]=\begin{bmatrix}\frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \cdots & \frac{\partial N_8}{\partial x} & 0\\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \cdots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial y}\\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0\\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_8}{\partial y} & \frac{\partial N_8}{\partial x}\end{bmatrix}. \tag{32}$$

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

$$\{\sigma\}=[C]\{\varepsilon\}, \tag{33}$$

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

$$[C]=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix}1-\nu & \nu & \nu & 0\\ \nu & 1-\nu & \nu & 0\\ \nu & \nu & 1-\nu & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2}\end{bmatrix}, \quad (34)$$

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

ν – коэффициент Пуассона.

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

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix}=[C]\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix}. \quad (35)$$

5.7.17 В результате преобразования формул (34) и (35) получаем формулу для определения напряжений и деформаций:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix}=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix}1-\nu & \nu & \nu & 0\\ \nu & 1-\nu & \nu & 0\\ \nu & \nu & 1-\nu & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix}. \quad (36)$$

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

$$k_{st}=\frac{\sum S_r}{\sum S_m}, \quad (37)$$

где ΣS_r – суммарная сдвиговая прочность грунта по поверхности скольжения;

ΣS_m – сумма сдвигающих усилий по поверхности скольжения.

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

$$S_r=\tau_r l; \quad (38)$$

$$S_m = \tau_m l. \quad (39)$$

5.7.20 Расчет сдвиговой прочности грунта τ_r в середине основания отсека производится с использованием критерия прочности Кулона – Мора:

$$\tau_r = (\sigma_n - u)\,\mathrm{tg}\,\varphi + c, \quad (40)$$

где σ_n – нормальное напряжение в середине основания отсека, кПа;

u– поровое давление в середине основания отсека, кПа.

5.7.21 Расчет нормального σ_n и касательного τ_m напряжений в середине основания каждого отсека производится с использованием формул:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta; \quad (41)$$

$$\tau_m = \tau_{xy}\cos 2\theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\sin 2\theta; \quad (42)$$

где σ_x – полное напряжение в направлении оси X в середине основания отсека, кПа;

σ_y– полное напряжение в направлении оси Y в середине основания отсека, кПа;

τ_{xy} – касательное напряжение в плоскости XOY в центре основания отсека, кПа;

θ – угол между положительным направлением оси X и направлением приложения нормального напряжения, град.

5.7.22 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.

Приложение А
(справочное)

Пример расчета устойчивости склона псевдостатическим методом

А.1 Оценку устойчивости оползневого склона автомобильной дороги выполняем псевдостатическим методом в соответствии с разделом 5.5.

А.2 Исходные условия.Склон сложен оползневыми накоплениями, а их подошва (плоскость скольжения, см. рисунок А.1) является поверхностью ослабления.Угол внутреннего трения по поверхности ослабления составляет $\varphi=10^{\circ}$ ($tg\varphi=0{,}176$), а сцепление $c=10$ кПа.В оползневых накоплениях, имеется безнапорный водоносный горизонт; уровень подземных вод (УПВ на рисунке А.1), подошва горизонта находится на больших глубинах ниже подошвы оползневых накоплений.Удельный вес оползневых накоплений составляет $\gamma=17{,}2$ кН/м^{3}как в пределах водоносного горизонта, так и выше уровня подземных вод.Склон находится в районе с сейсмичностью 9 баллов.

А.3 Расчет коэффициента устойчивости псевдостатическим методом. Разбиваем массив оползневых накоплений на пятнадцать отсеков №№ 1–15, отличающихся по крутизне наклона α_i своей подошвы и β_iуровня подземных вод (рисунок А.1). Для каждого отсека определяем площадь сечения S_i , площадь обводненной части $S^{в}_i$и длину подошвы l_i. Полученные данные сводим в таблицу А.1. Вычисляем полный вес отсека$p_i=s_i\gamma$и вес отсека с учетом гидростатическоговзвешивания$p_i'=p_i-\omega_i\gamma_{вод}$ (где $\gamma_{вод}=10$ кН/м^3 удельный вес воды), а также величины сдвигающих $p_i'sin\alpha_i$и нормальных усилий $p_i'cos\alpha_i$, создаваемых по подошве отсека весом вышезалегающих пород.

Так как оползневые накопления попадают в самую верхнюю часть водоносного горизонта, принимаем, что для всех обводненных отсеков уклон равнодействующей фильтрационного давления равен уклону уровня подземных вод, а величина гидравлического градиента равна$I_i=sin\beta$. В соответствии с формулой (10) находим для каждого обводненного отсека нормальную(I_i^N) и тангенциальную (I_i^T) составляющиефильтрационного давления, где$I_i^N=\gamma_в\omega_i I_i sin(\beta_i-\alpha_i)\cdot 1$ми$I_i^T=\gamma_в\omega_i I_i cos(\beta_i-\alpha_i)\cdot 1$м.

Сейсмические силы вычисляем в соответствии с формулой (10). При этом вес отсековp_i определяется без учета гидростатического взвешивания, а коэффициент сейсмичности μ для расчетной сейсмичности 9 баллов по таблице 4 равен 0,1.

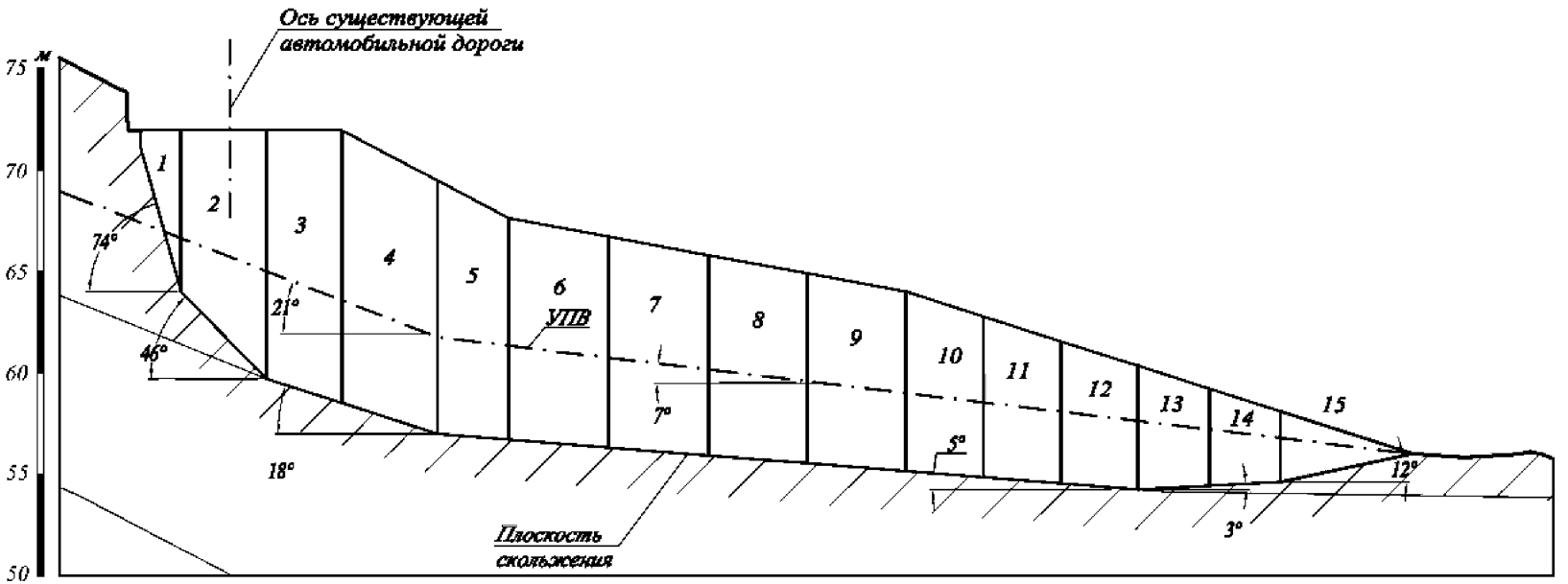


Рисунок А.1 – Схема к расчету устойчивости склона псевдостатическим методом

Т а б л и ц а А.1 – Результаты расчета устойчивости склона в сейсмическом районе

Номер отсека	α_i, *град*	β_i, *град*	S_i, $м^2$	$S^{в}_i$, $м^2$	p_i, *кН*	p'_i, *кН*	l_i, *м*	$\beta_i - \alpha_i$	$p'_i \sin\alpha_i$	$p'_i \cos\alpha_i$	I_i^N	I_i^T	$p_i \mu \sin\alpha_i$	$p_i \mu \cos\alpha_i$
1	74	21	8,8	1,09	148,2	137,3	7,4	-53	132,0	37,9	-3,07	2,31	14,25	4,09
2	46	21	42,43	16,66	715,2	548,6	6	-25	394,6	381,1	-24,73	53,03	51,45	49,68
3	18	21	47,55	19,19	801,5	609,6	3,89	3	188,4	579,7	3,53	67,31	24,77	76,22
4	18	21	60,97	23,15	1027,7	796,2	4,94	3	246,0	757,2	4,25	81,18	31,76	97,74
5	5	7	40,97	16,48	690,5	525,8	3,52	2	45,8	523,8	0,69	19,67	6,02	68,79
6	5	7	52,22	22,23	880,3	658,0	4,92	2	57,3	655,5	0,93	26,53	7,67	87,69
7	5	7	49,68	21,25	837,3	624,8	4,92	2	54,5	622,5	0,89	25,36	7,30	83,41
8	5	7	46,79	20,13	788,7	587,4	4,88	2	51,2	585,2	0,84	24,02	6,87	78,57
9	5	7	44,31	19,18	746,8	555,1	4,88	2	48,4	553,0	0,80	22,89	6,51	74,40
10	5	7	31,84	14,28	536,7	393,9	3,81	2	34,3	392,4	0,60	17,04	4,68	53,47
11	5	7	28,37	13,71	478,2	341,1	3,81	2	29,7	339,8	0,57	16,36	4,17	47,64
12	5	7	24,87	13,12	419,2	288,0	3,81	2	25,1	286,9	0,55	15,66	3,65	41,76
13	-3	7	19,01	10,76	320,4	212,9	3,51	10	-11,1	212,6	2,23	12,65	-1,68	32,00
14	-3	7	14,44	8,32	243,3	160,2	3,51	10	-8,4	159,9	1,72	9,78	-1,27	24,30
15	-12	7	11,28	7,04	190,2	119,7	6,65	19	-24,9	117,1	2,74	7,95	3,95	18,60
		Сумма					70,42	$\sum p'_i \sin\alpha'_i$	1307,4	6204,5	-7,49	401,8	162,2	838,4
								$\sum p'_i \sin\alpha''_i$	44,42					

Определяем коэффициент устойчивости k_{st} в соответствии с формулой 10:

$$k_{st} = \frac{\sum \left| p'_i \cos\alpha_i + I_i^N - p_i \mu \sin\alpha_i \right| \cdot tg\varphi + \sum c_i \cdot l_i + \sum p'_i \sin\alpha''_i}{\sum p'_i \sin\alpha'_i + I_i^T + \sum p_i \mu \cos\alpha_i} =$$

$$= \frac{(6204{,}5 + (-7{,}49) - 162{,}2) \cdot 0{,}176 + 10 \cdot 70{,}42 + 44{,}42}{1307{,}4 + 401{,}8 + 838{,}4} = 0{,}713$$

А.4 Выводы: В результате расчета получен расчетный коэффициент устойчивости склона k_{st} для условий сейсмического воздействия по псевдостатическому методу. Данный коэффициент свидетельствует о необходимости укрепления рассматриваемого склона.

ПриложениеБ
(справочное)

Пример расчета устойчивости склона динамическим методом

Б.1 Оценку устойчивости оползневого склона автомобильной дороги выполняем динамическим методом в соответствии с разделом 5.7.

Б.2 Исходные условия.Склон сложен оползневыми накоплениями, а их подошва (плоскость скольжения, см. рисунок Б.1) является поверхностью ослабления. Физико-механические характеристики грунтов, слагающих склон, представлены в таблице Б.1.В оползневых накоплениях, имеется безнапорный водоносный горизонт; уровень подземных вод (УПВ на рисунке Б.1), подошва горизонта находится на больших глубинах ниже подошвы оползневых накоплений.Удельный вес оползневых накоплений постоянен как в пределах водоносного горизонта, так и выше уровня подземных вод.Склон находится в районе с сейсмичностью 9 баллов.

Т а б л и ц а Б.1 – Физико-механические характеристики грунтов

Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Свойства грунтов		
			ИГЭ-1	ИГЭ-2	ИГЭ-3
Удельный вес грунта	γ	кН/м^3	17,2	19,2	20,9
Угол внутреннего трения	φ	град	10	16	27
Удельное сцепление	c	кПа	10	25	430
Модуль деформации	E	МПа	9,6	10,7	64
Коэффициент Пуассона	μ	–	0,452	0,42	0,353
Модуль сдвига максимальный	G_{max}	кПа	5000	5000	5000
Коэффициент демпфирования	ξ	–	0,1	0,1	0,1

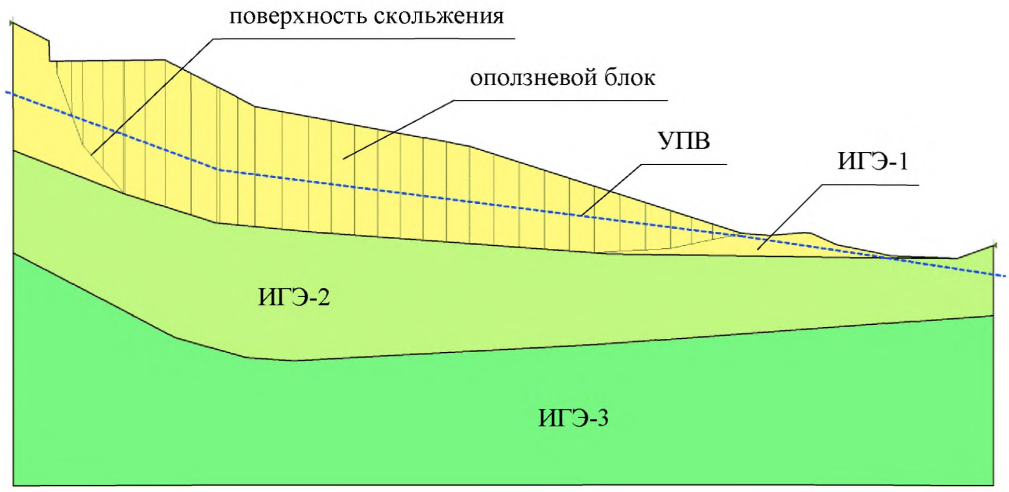


Рисунок Б.1 – Схема к расчету устойчивости склона динамическим методом

Б.3 Расчет производился по заданной поверхности скольжения впрограмме GeoStudio в модуле SLOPE/Wна основании данных из модулей SIGMA/Wи QUAKE/W без учета влияния разжижения грунтов. Сейсмические силы вычислены в соответствии с заданной акселерограммой (рисунок Б.2), отмасштабированной по пиковому значению ускорения до значений, соответствующих расчетной сейсмичности.

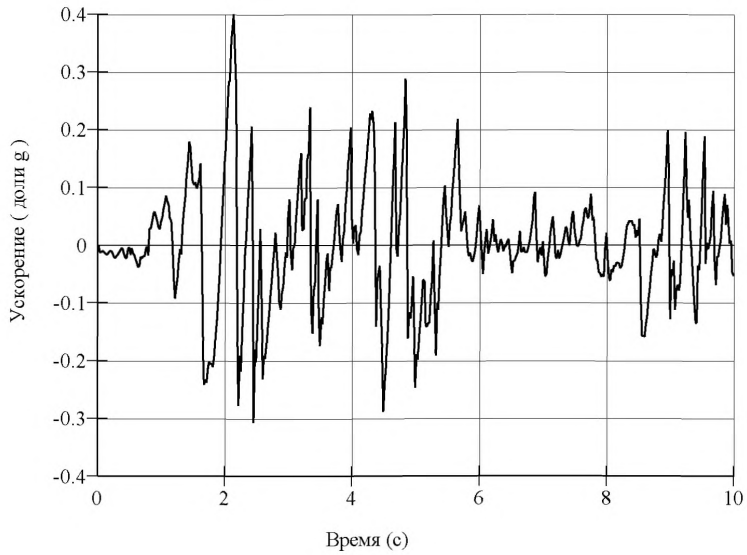


Рисунок Б.2 – Акселерограмма, использованная при динамическом расчете

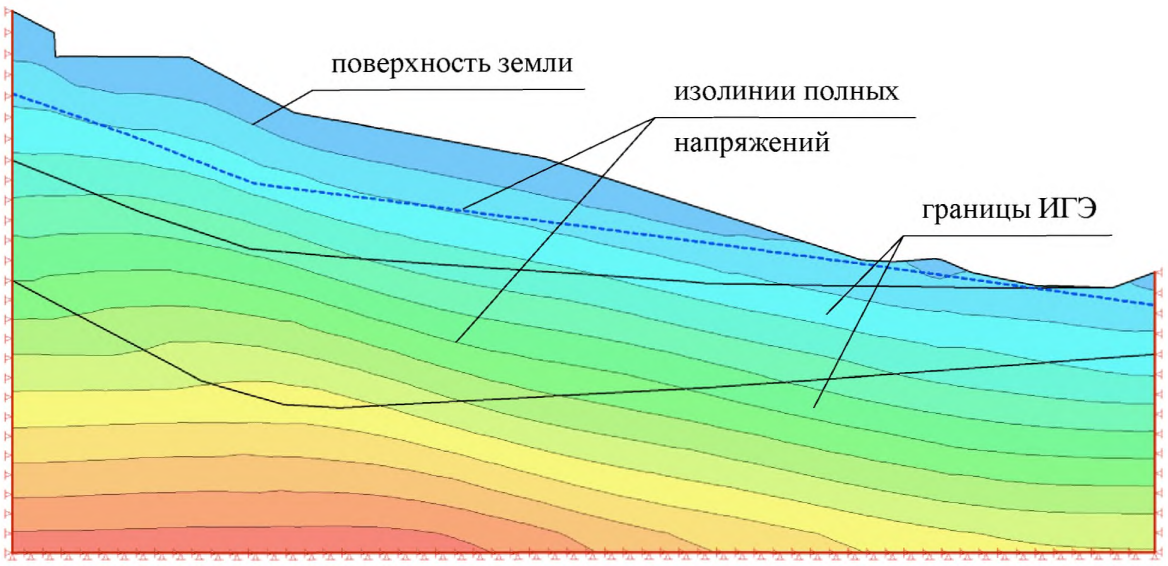


Рисунок Б.3 – Эпюра максимальных полных напряжений в грунтовом массиве при статическом расчете

Б.4 В соответствии с 5.7.6 был произведен статический расчет склона, и были получены начальные напряжения (рисунок Б.3), которые были использованы для последующего динамического расчета.

Коэффициент устойчивости склона на основании статического расчета составил 1,103 (рисунок Б.4).

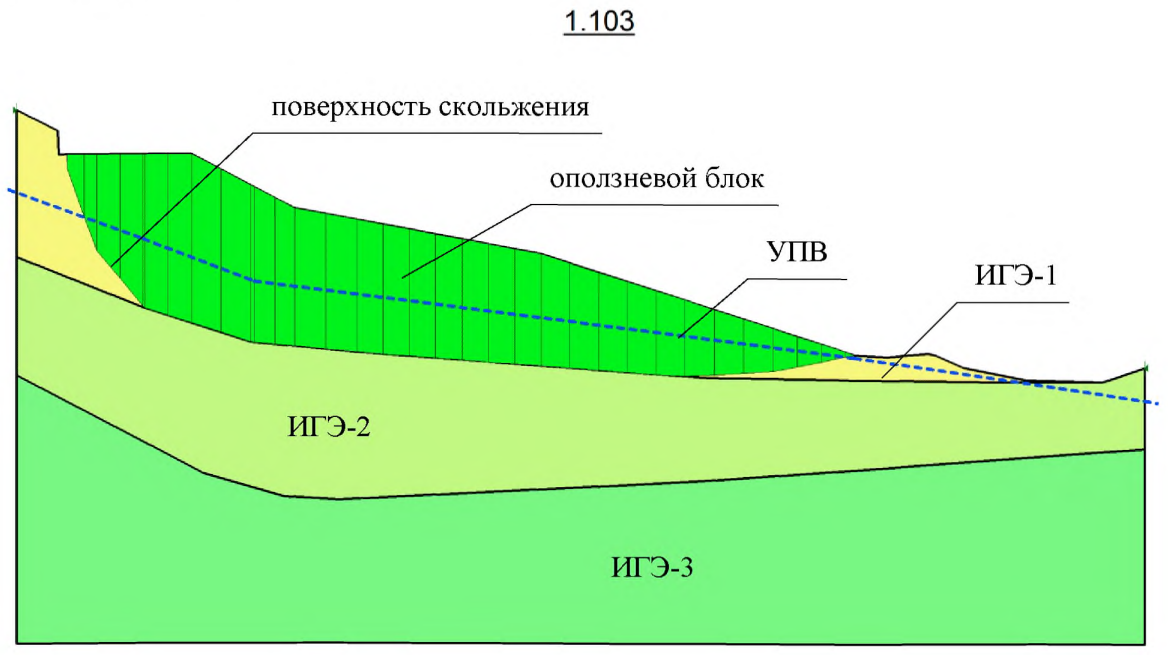


Рисунок Б.4 – Призма обрушения при потере устойчивости склона (k_{st}=1,103). Статический расчет

Б.5 Минимальный коэффициент устойчивости был достигнут на временной отметке 5,8 сек во время динамического расчета и составил 0,782 (рисунок Б.5).

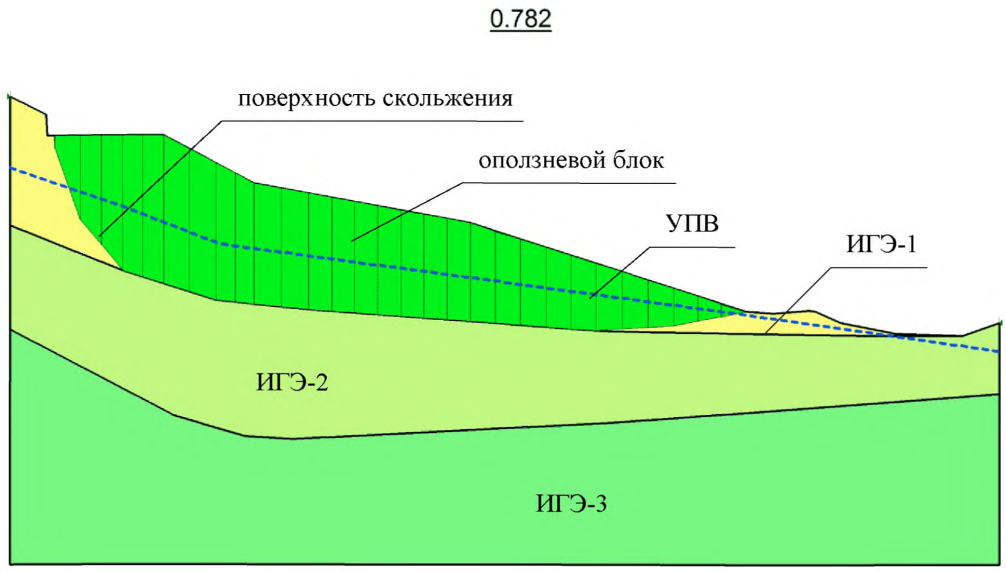


Рисунок Б.5 – Призма обрушения при потере устойчивости склона (k_{st}=0,782). Динамический расчет

Б.6 Выводы: При динамическом воздействии рассматриваемый склон перейден в неустойчивое состояние. Для обеспечения безопасности эксплуатации автомобильной дороги необходимо укрепление оползневого склона посредством устройства противооползневых сооружений и мероприятий.

Библиография

[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 11–105–97Часть V	Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть V. Правила производства работ в районах с особыми природно-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 деформируемостинемерзлых 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.

ОКС 93.080.99
Ключевые слова: сейсмическая устойчивость склона, коэффициент устойчивости, оползень, сейсмичность, коэффициент сейсмичности, псевдостатический метод расчета, динамический метод расчета, акселерограмма, динамические свойства грунтов

Руководитель организации-разработчика
ООО «НТЦ ГеоПроект»
наименование организации

Директор		С. И. Маций
должность	личная подпись	инициалы, фамилия

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО

(РОСАВТОДОР)

РАСПОРЯЖЕНИЕ

08.10.2015 Москва № 1866-р

Об издании и применении ОДМ 218.2.053-2015 «Рекомендации по оценке сейсмического воздействия при определении устойчивости оползневых участков автомобильных дорог»

В целях реализации в дорожном хозяйстве основных положений Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» и обеспечения дорожных организаций рекомендациями по оценке сейсмического воздействия при определении устойчивости оползневых участков автомобильных дорог:

1. Структурным подразделениям центрального аппарата Росавтодора, федеральным управлениям автомобильных дорог, управлениям автомобильных магистралей, межрегиональным дирекциям по строительству автомобильных дорог федерального значения, территориальным органам управления дорожным хозяйством субъектов Российской Федерации рекомендовать к применению с даты утверждения настоящего распоряжения ОДМ 218.2.053-2015 «Рекомендации по оценке сейсмического воздействия при определении устойчивости оползневых участков автомобильных дорог» (далее – ОДМ 218.2.053-2015).

2. Управлению научно-технических исследований и информационного обеспечения (А.В. Бухтояров) в установленном порядке обеспечить издание ОДМ 218.2.053-2015 и направить его в подразделения и организации, указанные в пункте 1 настоящего распоряжения.

3. Контроль за исполнением настоящего распоряжения возложить на заместителя руководителя А.А. Костюка.

Руководитель Р.В. Старовойт

gost.e-ecolog.ru

О.В. Капирина
(495) 687-88-23 доб. 50-271