

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

В.Ю. Радоуцкий, В.Н. Шульженко, А.А. Смаглюк

Опасные природные процессы

Учебное пособие

Белгород 2007

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

В.Ю. Радоуцкий, В.Н. Шульженко, А.А. Смаглюк

Опасные природные процессы

Под редакцией В.Ю. Радоуцкого

Утверждено советом университета в качестве учебного пособия для
студентов специальности 280103 – Защита в чрезвычайных ситуациях

Белгород 2007

УДК 355(07)
ББК 68.9я7
Р 15

Рецензенты: А.Г. Пастухов, канд. техн. наук, доц. (БГСХА, г. Белгород);
В.И. Беляева, канд. техн. наук, доц. (БГТУ им. В.Г. Шухова)

Р15 Радоуцкий, В.Ю.

Опасные природные процессы: учеб. пособие / В.Ю. Радоуцкий, В.Н. Шульженко, А.А. Смаглюк; под ред. В.Ю. Радоуцкого. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2007. – 206 с.

В учебном пособии рассмотрены причины и механизмы формирования опасных природных процессов. Дана оценка физических полей основных поражающих факторов землетрясений, оползней, обвалов, снежных лавин, вулканических извержений, наводнений на реках и на морских побережьях, селей, ураганных ветров, пыльных и снежных бурь, грозových разрядов, ландшафтных пожаров, падений на земную поверхность космических тел, массовых заболеваний людей, животных, растений. Даны инженерный способ расчета очагов поражения при таких катастрофах и рекомендации по оценке обстановки в очагах поражения. Приведены рекомендации по защите населения в условиях чрезвычайных ситуаций, обусловленных опасными природными процессами.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 280103 – Защита в чрезвычайных ситуациях, изучающих дисциплину «Опасные природные процессы».

Табл. 37. Ил. 45. Библиогр.: 72 назв.

Учебное пособие публикуется в авторской редакции

УДК 355(07)
ББК 68.9я7

©Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Опасные природные процессы» предназначено для студентов специальности 280103 – Защита в чрезвычайных ситуациях, изучающих дисциплину «Опасные природные процессы».

Под опасными природными процессами обычно подразумевают природные катастрофы и стихийные бедствия, сопровождающиеся гибелью людей и большим экономическим ущербом. К ним относят: землетрясения, оползни, обвалы, снежные лавины, вулканические извержения, наводнения на реках и морских побережьях, вихревые течения в атмосфере, приводящие к ураганам ветрам, пыльные и снежные бури, гроззовые разряды молнии, лесные, торфяные и степные пожары, массовые заболевания людей, животных и растений, падение на нашу планету космических тел и т.д.

Такие катастрофы и стихийные бедствия в истории Земли отмечены неоднократно. Легенды о гибели Атлантиды, Всемирном потопе, засыпанные песками пустынь древние города Средней Азии, погребенные под слоем вулканического пепла города Помпеи, Геркулантум, Стабия в Италии – свидетельства грозных природных явлений. О масштабах потерь и человеческих трагедий можно получить представление по следующим данным.

При извержении вулкана Кракатау в 1883 г., сопровождавшемся взрывом, погибло 200 тыс. человек. При землетрясении в Китае в 1923 г. (провинция Нинся) погибло около 200 тыс. человек, в 1976 г. (Таншань) – 243 тыс. человек. Большую опасность представляют массовые заболевания людей. Эпидемия чумы в Европе в XIV веке унесла 25 млн. человеческих жизней, то есть умер каждый четвертый житель этой части света, эпидемия гриппа в Западной Европе в 1918-1920 г. – 20 млн. жизней, то есть столько, сколько погибло в течение Первой мировой войны. По данным ООН за последние 10 лет от наводнений пострадало 150 млн. человек.

Отдельно нужно остановиться на падении крупных космических тел на нашу планету. Оценено, что при падении космического тела средним размером 1 км в густо населенном районе может погибнуть до четверти населения планеты. В истории Земли случаи падения таких и более крупных тел имели место.

В пособии не ставится задача объемного изложения материала по всем вопросам, поэтому отдельные темы, которые достаточно широко освещены в имеющейся литературе, например, массовые заболевания людей, животных, растений, изложены конспективно. Более подробно

рассмотрены физика землетрясений, наводнений, атмосферных вихревых движений, ландшафтных пожаров, падений на планету космических тел и ряд других природных процессов, способы определения основных поражающих факторов этих явлений, способы определения очагов поражения и оценки обстановки в очагах поражения, что потребовало привлечения отдельных положений тензорного исчисления и теории вероятностей.

Изложение материала сопровождается рисунками и таблицами, содержащими необходимые справочные данные.

Глава 1. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

1.1. Природа землетрясений и их классификация

Землетрясения – грозные природные явления, с которыми связаны наиболее сильные катастрофы. При землетрясении, как правило, формируется обширный очаг поражения, на территории которого разрушаются и повреждаются здания, сооружения, техника, гибнут и получают травмы различной степени тяжести люди. Для определения очага поражения необходимо знать физические параметры землетрясения и критерии поражения различных объектов. Ежегодно на нашей планете происходит порядка 100000 землетрясений, из них 100...120 способны вызвать разрушения и 10...20 оказываются достаточно сильными [1].

Землетрясения – это толчки и колебания земной поверхности, обусловленные смещением горных пород и распространением по фунтовой среде упругих сейсмических волн. По механизму образования землетрясения подразделяются на обвальные, наведенные, тектонические, вулканические и вызванные падением космических тел.

Обвальные землетрясения происходят при разрушении сводов подземных карстовых пустот, заброшенных шахт, рудников, а также обвалах, сбросах горных пород. Возникающие при этом толчки и колебания земной поверхности относительно слабы.

Наведенные землетрясения связаны с дополнительным давлением на земную кору, создаваемым строящимися крупными плотинами и водохранилищами, а также с изменением порового давления в фунтах при закачке воды в скважины и, наоборот, при интенсивном отборе воды с подземных горизонтов.

Сильное землетрясение, вызванное заполнением водохранилища, имело место в районе расположения плотины Койна в Индии. Вскоре после начала заполнения водохранилища здесь стали ощущаться слабые толчки и колебания земной поверхности. Водоохранилище было заполнено полностью к 1965 году, а в декабре 1967 года произошло землетрясение магнитудой 6,4, что соответствует энерговыделению при землетрясении $\sim 10^{14}$ Дж (определение магнитуды и связь этой величины с энергией землетрясения даются в п. 1.3). Землетрясения меньшей интенсивности наблюдались при заполнении водохранилищ у плотин Гувер и Оровилл в США, плотины Синьфын в Китае, плотины Монтэр во Франции, плотины Кремаста в Греции и в некоторых других странах [2].

Землетрясение магнитудой 5,2, что соответствует энерговыделению $\sim 10^{12,7}$ Дж, обусловленное закачкой загрязненной отходами воды в скважину глубиной три километра, имело место в 1967 в штате Колорадо в США. И это не единственный случай.

Тектонические землетрясения обусловлены движением земной коры. Наша планета имеет сложную структуру. Земная кора и верхняя часть мантии (субстрат) представляют собой твердую наружную оболочку – литосферу. Литосфера не сплошная оболочка. Она состоит из плит, средние горизонтальные размеры которых варьируются от нескольких сотен до нескольких тысяч километров. Ниже литосферы находится горячая мантия. Под действием сил, обусловленных глубинными тепловыми процессами и вращением Земли, плиты движутся со скоростью, как правило, нескольких сантиметров в год. В результате на границах литосферных плит возникают огромные механические напряжения, сопровождающиеся разрушением земных пород, – они и приводят к тектоническим землетрясениям. Тектонические землетрясения – основной тип землетрясений на нашей планете. Самые сильные из них имеют магнитуду 9,0, что соответствует энерговыделению $\sim 10^{18}$ Дж. К числу сильнейших землетрясений XX века относят землетрясение у берегов Эквадора (1906 г., магнитуда 8,9) и землетрясение у берегов Японии (Санрику, 1933 г., магнитуда 8,9). Землетрясения, сопровождавшиеся большими человеческими жертвами и большим экономическим ущербом: Китай (пров. Нинся, 1920 г., магнитуда 8,6, погибло 200000 чел.), Япония (Токио, 1923 г., магнитуда 8,3, погибло 99300 чел.), Перу (Чимботе, 1970 г., магнитуда 7,8, погибло 67000 чел), Китай (Ганшань, 1976 г., магнитуда 7,8, погибло 243000 чел.).

Вулканические извержения могут вызвать также тяжелые последствия, примером тому являются извержения вулканов Санторин на одноименном острове в Эгейском море в 1470 году до Новой Эры, Томборо на острове Сумбава в Индонезии в 1815 году, Кракатау на одноименном острове в Зондском проливе между островами Ява и Суматра в 1883 году. Последствия этих извержений были катастрофическими. Так извержение вулкана Кракатау сопровождалось мощными взрывами, уничтожившими половину вулканического острова. В атмосферу было выброшено $\sim 19 \text{ км}^3$ вулканической породы. Песок, пыль, обломки скал, вулканический пепел гигантским столбом поднялись на высоту до 80 км. Воздушные волны, порожденные взрывами, распространяясь со скоростью звука, трижды обогнули земной шар. Одновременно на морской акватории сформировались

волны цунами высотой свыше 30 метров, поглотившие на берегах островов Явы и Суматры 36 тысяч человек. Общее число погибших от ядовитых газов, пепла, лавы, падающих вулканических бомб, камней, цунами составило ~200 тысяч человек [3]. Энерговыделение при извержении и взрыве вулкана Кракатау оценивается величиной $\sim 10^{19}$ Дж, а вулканов Санторин и Томборо $\sim 10^{20}$ Дж [4]. Для сравнения энергия ядерного взрыва мощностью $q = 10^6$ тонн, где q – тротильный эквивалент взрыва, составляет $4,52 \cdot 10^{15}$ Дж.

Энерговыделение при тектонических землетрясениях $\sim 10^{18}$ Дж и извержениях вулканов $\sim 10^{20}$ Дж, по-видимому, составляет предел силы геологических пароксизмов на нашей планете. Размер их лимитирует прочность горных пород. Больших напряжений земная кора не выдерживает – землетрясение или вулканический взрыв снимают их.

Землетрясения в результате падения космических тел хотя и представляют собой явления более редкие, но их последствия могут быть очень тяжелыми.

В последнее время существование опасности падения на Землю астероидов с характерным размером 50...100 м не вызывает сомнений. Их наблюдают астрономы в обозримом с Земли пространстве на достаточно близком расстоянии, а примерно раз в 200...300 лет такие космические тела падают на нашу планету. Последнее подобное столкновение – падение Тунгусского метеорита (или фрагмента кометы) произошло в 1908 году. Характерный размер объекта составлял не более 50 м, энергия взрыва оценивается величиной $\sim 10^{16}$ Дж. Энерговыделение при падении небесных тел с характерным размером порядка 1 км может составить величину 10^{20} ... 10^{21} Дж. При взрыве такой мощности в густо населенных районах нашей планеты может погибнуть ~ четверть населения Земли [5]. Средний интервал времени между падением таких астероидов оценивается ~ 500000 лет. Еще большую опасность представляет возможное падение космических тел с характерным размером > 1 км. Так энерговыделение при падении астероида, образовавшего 28 млн. лет тому назад Попигайский кратер, оценивается величиной 10^{23} ... 10^{24} Дж.

На рис. 1 приведена частота повторяемости различных природных катастроф с энерговыделением от 10^{13} Дж до 10^{23} ... 10^{24} Дж [4].

На этом рисунке область 1 отвечает случаям падений метеоритов и астероидов, 2 – вулканических взрывов, 3 – тектонических землетрясений. Границы областей указывают возможный временной интервал событий.

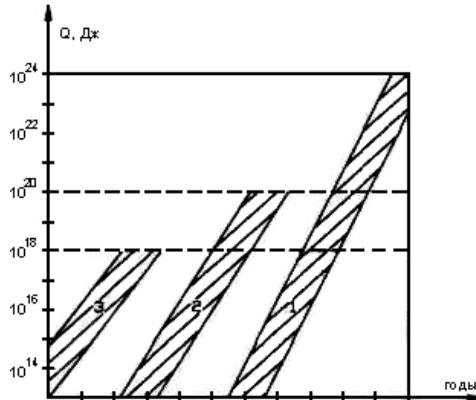


Рис. 1 .Частота повторяемости природных катастроф

Из рисунка видно, что в среднем катастрофа с энерговыделением 10^{18} Дж может быть вызвана землетрясением 1 раз в год, вулканическим взрывом 1 раз в 200...300 лет, падением метеорита 1 раз в $\sim(50...100) \cdot 10^3$ лет.

Максимальное энерговыделение вулканической катастрофы примерно в 100 раз больше, чем при самом сильном тектоническом землетрясении, но периодичность таких событий менее 1 за 1000 лет. Астероиды, крупные метеориты могут вызвать самую сильную на Земле катастрофу, но эти события происходят ещё реже.

1.2. Строение Земли. Движение земной коры

Земля имеет форму, близкую к сферической, слегка приплюснутую у полюсов, радиусом 6371 км. Наша планета не статична. Если это было бы не так, поверхность Земли давно была бы выровнена эрозией и стала плоской, а океан залил бы ее целиком.

Кора, мантия, ядро – главные части Земли. Некоторое представление об ее строении можно получить по данным табл. 1 [6].

По мере приближения к центру Земли температура, плотность вещества и давление возрастают. В центре температура составляет ~ 4200 °С, плотность $\sim 13 \cdot 10^3$ кг/м³, давление $\sim 3,6 \cdot 10^8$ кПа (для сравнения, плотность стали $7,9 \cdot 10^3$ кг/м³, температура плавления 1500 °С).

Строение Земли

Геосферы	Структура	Глубина нижней границы, км	
Земная кора	Осадочный слой	До 10...20	
	Гранитный слой	До 30...40	
	Базальтовый слой	До 50...70	
Мантия	Субстрат	50...100	
	Верхняя мантия	Слой Гуттенберга Слой Голицына	300...400 ~900
	Нижняя мантия		~2900
	Ядро	Внешнее ядро Внутреннее ядро	5100 6371

Земная кора, гидросфера и атмосфера образовались из вещества мантии, когда-то поднявшегося к поверхности и охладившегося. Этот процесс продолжается и в настоящее время и виден, например, при извержениях вулканов, когда раскаленная лава, рождающаяся в мантии, выходит из недр [6].

Как отмечалось в п. 1.1, кора и верхний слой мантии «субстрат» образуют твердую земную оболочку – литосферу, состоящую из плит различных размеров. Непосредственно под литосферными плитами находится слой горячего вязкого вещества, находящегося в особом полурасплавленном (местами частично расплавленном) состоянии, называемый астеносферой (от греческого «astes» – мягкий). Под действием сил, обусловленных глубинными тепловыми процессами и вращением Земли, плиты движутся по астеносфере [2]. Направления движения плит на этом рисунке помечены стрелками. Видно, например, что Южно-Американская плита отходит от Африканской, а Северо-Американская – от Евразийской. Такое движение плит связано с выдавливанием расплавленного вещества из астеносферы вверх в литосферу в районе Средне-Атлантического хребта, где оно остывает и образует новую кору, то есть имеет место процесс разрастания океанического дна. В результате раздвигания медленно движущиеся плиты налегают друг на друга в других местах – при этом в зонах столкновения происходят вздымаются горные системы, возникают вулканы и острова.

В разных местах плиты налегают друг на друга по-разному. Например, вдоль западного побережья Южной Америки плита Наска и Южно-Американская плита сталкиваются лоб в лоб. В результате первая из них отклоняется вниз и пододвигается под вторую. Этот процесс известен как субдукция (подвиг). Когда одна плита

пододвигается под другую, вдоль наклонной поверхности контакта плит, называемой зоной Беньоффа, происходят землетрясения. Как правило, при таком движении первая из плит стремится смять и приподнять вышележащую плиту, что также ведет к образованию горных цепей и вулканов.

По мере того, как в срединно-океанических хребтах из мантии формируется новая кора, старая возвращается в мантию в зонах субдукции. Основные зоны субдукции расположены вдоль Алеутских островов, возле Японии, вблизи Филиппинских островов, в Индонезии, у подножья Гималаев, у западных берегов Южной и Центральной Америки и в Персидском заливе.

В некоторых районах Земли плиты не сталкиваются, а скользят одна вдоль другой по разделяющей их границе. Наиболее известным примером такого движения является зона разлома Сан-Андреас на западной стороне Северо-Американской плиты.

Время от времени землетрясения происходят и во внутренних частях плит – так называемые внутриплитовые землетрясения. Они возникают из-за развития деформаций, вызванных давлением на краях плит. Например, территория Китая сдавливается с двух сторон: с востока – Тихоокеанской плитой, с юга – Индо-Австралийской. Наиболее вероятно, что эти воздействия несут ответственность за землетрясения в Китае, включая Таншаньское в 1976 г., которое привело к гибели большого количества людей.

Проведенный анализ материалов настоящего и предыдущего параграфов показывает сложную физическую картину возникновения землетрясений.

Характерным признаком землетрясений, несмотря на различие природы их происхождения, является наличие системы упругих сейсмических волн, распространяющихся по грунтовой среде на большие расстояния. Сейсмические волны являются основным поражающим фактором землетрясений. Для количественного описания этой волновой системы необходимо привлечение определенных положений теории упругости.

1.3. Некоторые сведения из теории упругости. Особенности напряженного состояния твердого тела

В теории упругости материал твердого тела (таким телом может быть грунтовая среда) представляется идеально упругим. Размеры и форма такого тела полностью восстанавливаются после устранения

причин, вызвавших деформацию, а между деформациями и напряжениями существует линейная зависимость (закон Гука) [7].

Деформацией твердого тела называется изменение его размеров и объема, сопровождающееся обычно изменением и его формы. Деформация вызывается внешними силовыми воздействиями или изменением температуры. При деформации происходит смещение частиц тела. Этому препятствуют силы взаимодействия между ними, вследствие чего в деформированном теле возникают внутренние упругие силы – напряжения.

В строгом смысле слова напряжение – это интенсивность внутренних усилий, то есть усилие, приходящееся на единицу площади сечения тела. Напряжение называется нормальным, если упругая сила нормальна к плоскости сечения, и касательным, если она касательна к этой плоскости. Указанные напряжения часто обозначают σ и τ соответственно.

Рассмотрение зависимости между напряжениями и деформациями ниже вначале проводится для важных частных случаев односторонних деформаций растяжения (сжатия) и сдвига, а также случая всестороннего сжатия тела.

Одностороннее или продольное растяжение (сжатие) состоит в увеличении (уменьшении) длины тела под действием растягивающей (сжимающей) силы F . Мерой деформации является относительное удлинение (сжатие) $\varepsilon = \Delta l / l$, где l – первоначальная длина тела, Δl – изменение длины при нагрузке F .

По закону Гука

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot S}, \quad (1.1)$$

где E – модуль Юнга; S – площадь поперечного сечения тела.

При $\Delta l = l$ модуль Юнга $E = F / S = \sigma$, то есть численно равен напряжению, возникающему в теле при увеличении его длины в два раза.

Известно, что разрушение тела наступает при значительно меньших напряжениях. Зависимость ε от σ для случая продольного растяжения тела представлена на рис. 2.

На рис. 2 обозначено: $\sigma_{\text{впр}}$ – предел упругости, то есть напряжение, ниже которого справедлив закон Гука; $\sigma_{\text{тек}}$ – предел текучести, то есть напряжение, при котором появляется текучесть – увеличение деформации без увеличения деформирующей силы; $\sigma_{\text{пр}}$ – предел

прочности – напряжение, при котором образуется местное сужение (шейка) и происходит разрушение тела (увеличение деформации даже при уменьшении деформирующей силы).

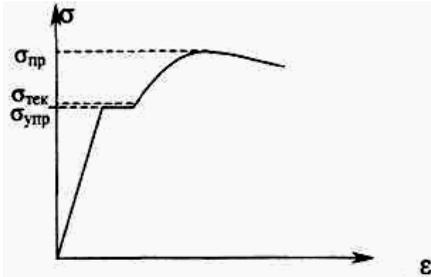


Рис. 2. Зависимость напряжения от относительной продольной деформации

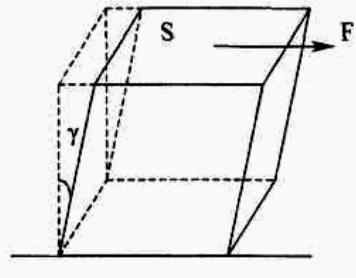


Рис. 3. Деформация сдвига

Относительное продольное растяжение (сжатие) тела сопровождается его относительным поперечным сужением (расширением) $\frac{\Delta d}{d}$, где d – поперечный размер тела.

Величина, равная отношению относительного поперечного сужения (расширения) к относительному продольному удлинению (сжатию),

$$\nu = \frac{\Delta d}{d} : \frac{\Delta l}{l}, \quad (1.2)$$

называется коэффициентом Пуассона. Обычно ν от 0 до 1.

Сдвигом называется деформация, при которой все плоские слои твердого тела, параллельные некоторой плоскости, смещаются параллельно друг другу. При сдвиге объем тела не меняется, рис. 3. Сдвиг происходит под действием силы F , приложенной касательно к верхней грани; нижняя грань закреплена неподвижно. Мерой деформации является угол сдвига γ , выраженный в радианах.

По закону Гука относительный сдвиг пропорционален касательному напряжению

$$\tau = \frac{F}{\varepsilon} = \gamma \cdot G, \quad (1.3)$$

где G – модуль сдвига.

Модуль сдвига численно равен напряжению, при котором сдвиг $\gamma = 1$.

Всестороннее сжатие тела под действием равномерно распределенного по его поверхности нормального напряжения σ приводит к уменьшению объема тела V на величину ΔV . Значение ΔV вычисляется по формуле

$$\Delta V = \frac{1}{K} \cdot V \cdot \sigma, \quad (1.4)$$

где K – модуль объемной упругости.

Модуль Юнга, коэффициент Пуассона, модули сдвига и объемной упругости связаны между собой соотношениями

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}; K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}. \quad (1.5)$$

В общем случае под действием внешних сил в теле могут иметь место одновременно и деформации растяжения (сжатия) и сдвига; при этом напряженное состояние в рассматриваемой точке тела определяется более сложными зависимостями, чем соотношения (1.1) – (1.5), а именно тензором напряжений.

Возникновение тензорного исчисления было подготовлено в XIX веке исследованиями в области дифференциальной геометрии: геометрии поверхностей (К. Гаусс) и геометрии многомерного метрического пространства (Б. Риман). Современную форму тензорному исчислению придал итальянский математик Г. Риччи-Кубастро. Идеи Риччи-Кубастро первоначально не получили широкого распространения. Внимание к ним возросло после появления (1915–1916 гг.) общей теории относительности А. Эйнштейна, математическая часть которой основана на тензорном исчислении. Понятие о тензоре напряжений можно получить, следуя рекомендациям [7].

Пусть требуется определить напряжение на наклонной площадке (по отношению к координатной системе xuz), проходящей через точку M . Для определения искомого напряжения выделим около этой точки элементарный тетраэдр $MABC$ (рис. 4). Грани MAB , MBC , MAC тетраэдра совпадают с координатными плоскостями xMu , yMz , xMz . Наклон грани ABC , параллельной заданной наклонной площадке,

определяется величинами направляющих косинусов нормали ν к этой грани. Обозначим косинусы углов между координатными осями x , y , z и направлением нормали ν соответственно через l , m , n :

$$\cos(\nu, x) = l, \cos(\nu, y) = m, \cos(\nu, z) = n.$$

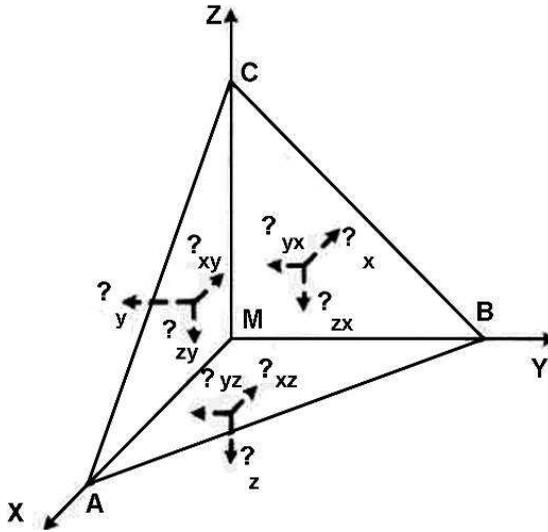


Рис. 4. Напряжения на гранях элементарного тетраэдра

Очевидно, при стягивании элементарного тетраэдра в точку грань ABC пройдет через точку M и напряжения на ней будут соответствовать напряжениям на заданной площадке.

В общем случае на тетраэдр могут действовать как объемные силы (например, сила инерции, сила тяжести), так и поверхностные – напряжения на его гранях.

Пусть известны составляющие напряжений, действующих по граням, совпадающим с координатными плоскостями, но напряжение ρ_ν , действующее на наклонной грани ABC , не известно (напряжение ρ_ν – полное напряжение).

Напряжение ρ_ν можно разложить на составляющие ρ_x , ρ_y , ρ_z , параллельные координатным осям. Обозначив площадь грани ABC через dF , нетрудно показать, что площади граней MBC , MAC и MAB будут соответственно равны ldF , mdF , ndF .

Так как тетраэдр ABC – это бесконечно малый тетраэдр, при составлении его равновесия объемными силами как бесконечно малыми

более высокого порядка, чем силы, действующие на грани, можно пренебречь. Тогда из условий равновесия тетраэдра следует:

$$\begin{aligned}\rho_x &= \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz}, \\ \rho_y &= \tau_{yz} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n, \\ \rho_z &= \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n.\end{aligned}\tag{1.6}$$

Соотношение (1.6) позволяет вычислить составляющие полного напряжения ρ_v на наклонной площадке, проходящей через заданную точку, по известным значениям $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$, составляющих напряжений в этой точке и значениям направляющих косинусов нормали к площадке l, m, n . Зная полное напряжение к этой площадке ρ_v , можно найти нормальное σ_v и касательное τ_v напряжения:

$$\begin{aligned}\rho_v &= \rho_x^2 + \rho_y^2 + \rho_z^2, \\ \sigma_v &= \rho_x l + \rho_y m + \rho_z n, \\ \tau_v^2 &= \rho_v^2 - \sigma_v^2.\end{aligned}\tag{1.7}$$

Следовательно, на любой наклонной площадке, проходящей через данную точку M , нормальное и касательное напряжения могут быть выражены через известные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \dots, \tau_{zy}$ или, иначе говоря, эти напряжения полностью характеризуют напряженное состояние в данной точке тела – они являются компонентами тензора напряжений.

Тензор напряжений обычно представляется матрицей вида

$$T_i = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}.\tag{1.8}$$

В матрице в каждой строке компоненты тензора имеют одинаковое направление, а в каждом столбце – относятся к одной и той же площадке. Нормальные напряжения располагаются по главной диагонали матрицы.

Таким образом, тензор напряжений – это величина, характеризующая напряженное состояние в рассматриваемой точке тела; компоненты тензора записываются в виде специальной матрицы.

Необходимо отметить, что в соответствие с законом парности касательных напряжений касательные напряжения с одинаковыми индексами, действующие на двух взаимно перпендикулярных площадках, равны друг другу по величине, то есть [7]

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}.$$

Следовательно, с учетом закона парности касательных напряжений напряженное состояние в точке тела характеризуется шестью компонентами напряжений по координатным осям. Обычно это компоненты

$$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}.$$

При равенстве по величине касательных напряжений $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$ матрица (1.6) симметрична относительно главной диагонали. Такой тензор называется симметричным.

С целью упрощения письма тензор напряжений записывается часто в виде

$$\delta\tau_{ik} = \begin{vmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{vmatrix}, i, k = 1, 2, 3,$$

где $\tau_{11} = \sigma_x, \tau_{22} = \sigma_y, \tau_{33} = \sigma_z$.

Итак, напряженное состояние в точке характеризуется тензором напряжений, а напряженное состояние тела – совокупность тензоров, образующее тензорное поле.

Важным свойством тензора напряжений является возможность приведения его к главным осям и, как следствие, возможность определения главных напряжений. Главными называются такие площадки, на которых касательные напряжения равны нулю. Нормальные напряжения, действующие на главных площадках, называются главными напряжениями.

Пусть на наклонной площадке с нормалью ν действует только нормальное напряжение σ_ν . В этом случае полное напряжение равно нормальному, то есть $\rho_\nu = \sigma_\nu = \sigma$, где σ – главное напряжение.

Составляющие полного напряжения по осям x , y , z равны $\rho_x = \sigma l, \rho_y = \sigma m, \rho_z = \sigma n$. Используя соотношение (1.6) нетрудно получить

$$\begin{aligned}\sigma l &= \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n, \\ \sigma m &= \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n, \\ \sigma n &= \tau_{xz} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n.\end{aligned}\tag{1.9}$$

Система однородных относительно l , m , n уравнений может быть преобразована к виду

$$\begin{aligned}(\sigma_x - \sigma)l + \tau_{xy}m + \tau_{xz}n &= 0, \\ \tau_{yx}l + (\sigma_y - \sigma)m + \tau_{yz}n &= 0, \\ \tau_{zx}l + \tau_{zy}m + (\sigma_z - \sigma)n &= 0.\end{aligned}\tag{1.10}$$

Система (1.10) имеет отличные от нуля решения, если ее определитель равен нулю, то есть [8]

$$\begin{vmatrix}(\sigma_x - \sigma) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - \sigma) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_z - \sigma)\end{vmatrix} = 0.\tag{1.11}$$

Определитель третьего порядка (1.11) можно записать в вид

$$\sigma^3 - J_1\sigma^2 + J_2\sigma + J_3 = 0,\tag{1.12}$$

где

$$\begin{aligned}J_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z, \\ J_2 &= \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_x + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2, \\ J_3 &= \sigma_x\sigma_y\sigma + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2.\end{aligned}$$

Корни этого кубического уравнения – искомые главные напряжения на главных площадках.

Для решения уравнения (1.12) используется подстановка:

$$\sigma = \alpha + \frac{1}{3} J_1. \quad (1.13)$$

Тогда уравнение (1.12) принимает вид

$$\alpha^3 + 3\rho\alpha + 2q = 0, \quad (1.14)$$

где

$$\rho = \frac{1}{3} \left(J_2 - \frac{1}{3} J_1^2 \right),$$

$$q = -\frac{1}{27} J_1^3 + \frac{1}{6} J_1 J_2 - \frac{1}{2} J_3.$$

Дискриминант $\Delta = \rho^3 + q^2$ уравнения (1.14) отрицателен, следовательно, все три его корня действительны. При $\Delta < 0$ для решения кубического уравнения применяют так называющий тригонометрический метод [7,8]:

$$\alpha_1 = \sqrt{|\rho|} \cos \varphi, \alpha_2 = 2\sqrt{|\rho|} \cos \left(\varphi + \frac{2}{3} \pi \right), \alpha_3 = 2\sqrt{|\rho|} \cos \left(\varphi - \frac{2}{3} \pi \right), \quad (1.15)$$

где $|\rho|$ – абсолютное значение коэффициента ρ ;

$$\varphi = \frac{-1}{3} \arccos \frac{q}{|\rho|^{3/2}}.$$

Для последующего определения главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, найденные значения корней $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ подставляются в выражение (1.13).

Подставив далее каждое из напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, в любые два уравнения (1.10) и используя геометрическое соотношение $l^2 + m^2 + n^2 = 1$, можно определить направляющие косинусы соответствующих главных площадок.

Так как для каждой точки тела имеются только три главные площадки и соответственно три главных напряжения, то эти

напряжения не зависят от выбора координат и, следовательно, коэффициенты J_1, J_2, J_3 также не зависят от выбора системы координат. Коэффициенты J_1, J_2, J_3 называют первым, вторым и третьим инвариантами тензора напряжений. Их можно выразить через главные напряжения в виде

$$J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, J_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1, J_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3. \quad (1.16)$$

С тензором напряжений непосредственно связана другая величина – тензор деформаций, характеризующая состояние деформированного тела в рассматриваемой точке [7].

Тензор деформации представляет собой также симметричную матрицу, построенную из составляющих, на которые в окрестности рассматриваемой точки может быть разложена любая сложная деформация элементарного (очень малого) объема твердого тела.

Если через данную точку провести координатные оси, например x, y, z , то тензор деформаций запишется в виде

$$T_D = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & 1/2 \gamma_{xy} & 1/2 \gamma_{xz} \\ 1/2 \gamma_{xy} & \epsilon_{yy} & 1/2 \gamma_{yz} \\ 1/2 \gamma_{xz} & 1/2 \gamma_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix}, \quad (1.17)$$

где компоненты тензора выражаются через проекции смещения W_x, W_y, W_z той же точки на оси x, y, z следующим образом:

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\partial W_x}{\partial x}, \epsilon_{yy} = \frac{\partial W_y}{\partial y}, \epsilon_{zz} = \frac{\partial W_z}{\partial z}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial W_x}{\partial y} + \frac{\partial W_y}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial W_y}{\partial z} + \frac{\partial W_z}{\partial y}, \gamma_{zx} = \frac{\partial W_z}{\partial x} + \frac{\partial W_x}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Тензор деформаций записывают также в виде

$$\delta \epsilon_{ik} = \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{vmatrix}, i, k = 1, 2, 3,$$

где $\epsilon_{11} = \epsilon_{xx}, \epsilon_{12} = \frac{1}{2}\gamma_{xy}, \dots, \epsilon_{33} = \epsilon_{zz}$.

Тензор деформаций, как и тензор напряжений, может быть приведен к главным осям. Главными осями деформаций называются такие три взаимно ортогональные прямые, проходящие через точку тела, которые совпадают по направлению с линейными элементами, испытывающими при деформации только изменения длин. Деформации этих элементов называются главными деформациями в точке тела. Сдвиги в главных осях деформации равны нулю.

Главные деформации определяются по уравнениям, аналогичным (1.10) – (1.14), при замене значений напряжения на величины соответствующих деформаций [7]. Главные деформации принято обозначать через $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$. Инварианты тензора деформаций, выражение через главные деформации имеют вид

$$J_1 = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3; J_2 = \epsilon_1\epsilon_2 + \epsilon_2\epsilon_3 + \epsilon_3\epsilon_1; J_3 = \epsilon_1\epsilon_2\epsilon_3. \quad (1.19)$$

В дальнейшем потребуется знание некоторых правил действий с тензорами [9].

При сложении (вычитании) тензоров δa_{ik} и δb_{ik} , где $i, k=1, 2, \dots, n$, образуется тензор δc_{ik} с компонентами:

$$c_{ik} = a_{ik} \pm b_{ik}. \quad (1.20)$$

При умножении скаляра A на тензор δa_{ik} образуется тензор δc_{ik} с компонентами:

$$c_{ik} = Aa_{ik}. \quad (1.21)$$

Тензорным произведением двух тензоров δa_{ik} и δb_{ik} называется тензор δc_{ik} с компонентами:

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^n a_{jr} b_{jk}, \quad (1.22)$$

где при суммировании берутся парные произведения компонентов строк первого тензора и компонентов столбцов второго тензора с

Упругие константы Ламе λ , μ связаны с модулем Юнга E , коэффициентом Пуассона ν и модулем сдвига G соотношениями

$$\lambda = \frac{2\nu G}{(1-2\nu)} = \frac{E\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)},$$

$$\mu = G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}.$$
(1.25)

С учетом правил сложения тензоров и умножения скаляра на тензор компоненты тензоров (1.23) могут быть записаны в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned}\tau_{11} &= \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu\varepsilon_{11}, \\ \tau_{22} &= \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu\varepsilon_{22}, \\ \tau_{33} &= \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu\varepsilon_{33}, \\ \tau_{12} &= 2\mu\varepsilon_{12}, \\ \tau_{23} &= 2\mu\varepsilon_{23}, \\ \tau_{31} &= 2\mu\varepsilon_{31}.\end{aligned}$$
(1.26)

Согласно закону парности касательных напряжений

$$\tau_{21} = \tau_{12}, \tau_{32} = \tau_{23}, \tau_{13} = \tau_{31}.$$

Соотношения (1.26) представляют собой обобщенный закон Гука. Они устанавливают связь между деформациями и напряжениями в случае сложного напряженного состояния тела.

Можно показать, что в важных частных случаях одностороннего сжатия (растяжения) и сдвига они переходят в известные состояния (1.1) – (1.3).

Пусть, например, имеет место одностороннее сжатие тела. При этом напряжения

$$\tau \neq 0, \tau_{22} = \tau_{33} = \tau_{12} = \tau_{23} = \tau_{31} = 0,$$

и система уравнений (1.26) принимает вид:

$$\begin{aligned}
\tau_{11} &= \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu\varepsilon_{11}, \\
0 &= \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu\varepsilon_{22}, \\
0 &= \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu\varepsilon_{33}, \\
0 &= \varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}.
\end{aligned} \tag{1.27}$$

Вычитая из второго уравнения этой системы третье уравнение, нетрудно получить

$$2\mu(\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33}) = 0.$$

Следовательно, деформации $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ и из второго уравнения (1.27) можно получить

$$0 = \lambda\varepsilon_{11} + 2\lambda\varepsilon_{22} + 2\lambda\varepsilon_{33}.$$

Отсюда с учетом соотношения (1.25)

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \frac{-\lambda}{2(\lambda + \mu)}\varepsilon_{11} = -\nu\varepsilon_{11}. \tag{1.28}$$

Подстановка значений ε_{22} и ε_{33} первое уравнение (1.27) с учетом соотношений (1.25) приводит к выражению

$$\tau_{11} = \frac{2\mu^2 + 3\lambda\mu}{\lambda + \mu}\varepsilon_{11} = E\varepsilon_{11}. \tag{1.29}$$

Соотношения (1.29), (1.28) есть не что иное, как формулы (1.1) и (1.2), причем знак минус в соотношении (1.28) перед коэффициентом Пуассона ν указывает, что при произвольном сжатии тела происходит увеличение его размеров в поперечном направлении и, наоборот, при растяжении в продольном направлении имеет место сужение тела в поперечном направлении.

Пусть имеет место односторонний сдвиг при $\tau_{12} > 0$. В этом случае

$$\tau_{11} = \tau_{22} = \tau_{33} = \tau_{23} = \tau_{31} = 0.$$

При сдвиге изменение объема тела не происходит. Следовательно

$$\theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 0.$$

С учетом данных соотношений из уравнений (1.27) можно получить

$$\begin{aligned} \tau_{12} &= 2\mu\varepsilon_{12}, \\ \varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{31} &= 0. \end{aligned}$$

Учитывая, что $\varepsilon_{12} = \frac{1}{2}\gamma_{12}$, $\mu = G$, где γ_{12} – угол сдвига, G – модуль сдвига, первое из этих соотношений принимает вид

$$\tau_{12} = G\gamma_{12},$$

что полностью совпадает с формулой (1.3).

1.5. Распространение колебаний в упругой среде

Распространение упругих возмущений в изотропной среде описывается уравнением Ламе [10]:

$$\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \text{grad div } W + \mu \Delta W + \rho F, \quad (1.30)$$

где ρ – плотность среды (грунта); W – смещение точек среды; F – массовая сила (например, если массовая сила – сила тяжести, то $F=g$); λ , μ – упругие константы Ламе.

В уравнении (1.30) величина $\text{div } W$ – это дивергенция, то есть расхождение векторного поля W в точке (x, y, z) . Если обозначить проекции векторного поля W на координатные оси через W_x, W_y, W_z , то можно представить

$$\text{Div } W = \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z}.$$

Величина $\text{grad div } W$ (градиент $\text{div } W$) – это вектор, показывающий направление наиболее быстрого изменения $\text{div } W$:

$$\text{graddiv}W = \frac{\partial}{\partial x}(\text{div}W) \cdot i + \frac{\partial}{\partial y}(\text{div}W) \cdot j + \frac{\partial}{\partial z}(\text{div}W) \cdot k,$$

где i, j, k – орты координатных осей x, y, z .

Величина Δ в уравнении (1.30) – это оператор Лапласа:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

При распространении упругих возмущений в неограниченной изотропной среде силой F обычно пренебрегают по сравнению с упругими силами и силами инерции. Тогда с учетом пояснений относительно значений $\text{graddiv}W$ и ΔW уравнение (1.30) можно записать в проекциях на координатные оси в виде

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 W_x}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial z^2} \right), \\ \rho \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial z^2} \right), \\ \rho \frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (1.31)$$

При распространение упругих возмущений на большие расстояния движение среды можно рассматривать как плоское движение. В этом случае смещение W зависит только от одной из декартовых координат, например x , и времени t :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 W_x}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2}, \\ \rho \frac{\partial^2 W_y}{\partial t^2} &= \mu \frac{\partial^2 W_y}{\partial x^2}, \\ \rho \frac{\partial^2 W_z}{\partial t^2} &= \mu \frac{\partial^2 W_z}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (1.32)$$

Обозначив

$$\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} = a^2; \frac{\mu}{\rho} = b^2, \quad (1.33)$$

нетрудно получить

$$\frac{\partial^2 W_z}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 W_z}{\partial x^2}; \frac{\partial^2 W_y}{\partial t^2} = b^2 \frac{\partial^2 W_y}{\partial x^2}; \frac{\partial^2 W_z}{\partial t^2} = b^2 \frac{\partial^2 W_z}{\partial x^2}. \quad (1.34)$$

Уравнения (1.34) представляют собой волновые уравнения, где величины a , b являются скоростями распространения возмущений. Видно, что скорости распространения составляющей смещения W_x и составляющих W_y , W_z различны. Следовательно, в рассматриваемом случае движения возмущений в упругой грунтовой среде формируется волновая система, состоящая из двух волн [10]. В одной из них смещение (W_x) совпадает с направлением распространения самой волны. Такая волна называется продольной и распространяется со скоростью

$a = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$. В другой – смещение $\left(\sqrt{W_y^2 + W_z^2}\right)$ лежит в плоскости,

ортогональной к направлению ее распространения. Такая волна называется поперечной и распространяется со скоростью $b = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$.

1.6. Потенциальная энергия напряжений

Потенциальная энергия деформаций численно равна работе внутренних усилий (напряжений) на перемещениях, вызванных действием этих усилий [7].

Рассмотрим, например, работу напряжения σ_x при деформации ϵ_x ,

$$Q_0 = \int_0^{\epsilon_x} \sigma_x d\epsilon_x = \int_0^{\epsilon_x} E\sigma_x d\epsilon_x = \frac{1}{2} E\epsilon_x^2 = \frac{1}{2} \sigma_x \epsilon_x^2, \quad (1.35)$$

где E – модуль Юнга, Q_0 – работа напряжения.

Рассмотрим далее работу напряжений σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} , действующих на гранях элементарного (бесконечно малого) объема,

например, куба с ребрами dx , dy , dz , при деформациях ε_x , ε_y , ε_z , γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} соответственно. По аналогии с выражением (1.35) нетрудно получить [7]

$$Q_0 = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \lambda_{xy} + \tau_{yz} \lambda_{yz} + \tau_{zx} \lambda_{zx}). \quad (1.36)$$

Используя зависимости между деформациями и напряжениями (1.26), с учетом соотношений (1.25) можно найти

$$Q_0 = \frac{1}{2E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - \frac{\mu}{E} (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2). \quad (1.37)$$

Если координатные оси x , y , z – главные оси деформации тогда $\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$; при этом соотношение (1.37) принимает вид

$$Q_0 = \frac{1}{2E} [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\mu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)], \quad (1.38)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения.

Потенциальная энергия напряженного тела может быть определена интегрированием соотношений (1.36) – (1.38) по всему объему тела:

$$Q = \iiint_V Q_0 dx dy dz. \quad (1.39)$$

При землетрясении очаг землетрясения находится обычно на глубинах от нескольких километров до нескольких сот километров. На таких глубинах напряжения в грунте могут достигать больших значений. Область, занятая очагом, также может иметь значительные размеры. Указанные обстоятельства объясняют выделение большого количества энергии при землетрясении.

1.7. Волновая система при землетрясении

Высвобождение накапливающейся длительное время в земной коре энергии напряжений сжатия, растяжения, сдвига обычно происходит в некотором объеме, называемом очагом землетрясения. В пределах очага имеет место разрушение земных пород. В геологии используется специальный термин – разлом [1,12].

Протяженность разлома (а значит и очаговой области) может достигать десятков, в отдельных случаях – сотен километров. Образование разлома часто сопровождается смещением земных пород. Если при этом образование разлома происходит в результате действия растягивающих усилий, то некоторый объем породы может соскользнуть вниз – возникает так называемый нормальный сброс. При сжатии часть породы может быть выдавлена вверх – такой разлом называют обращенным сбросом. Возможно также горизонтальное перемещение некоторого объема породы при наличии сдвигающих усилий; в этом случае говорят о поперечном сбросе. Указанные типы сбросов поясняет рис. 5.

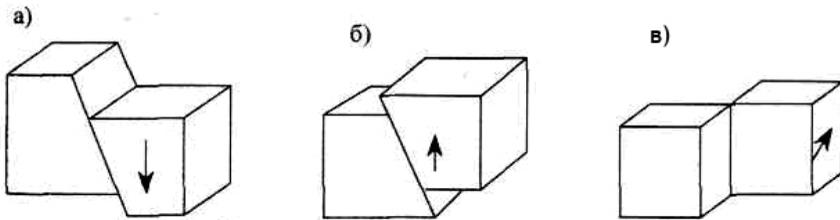


Рис. 5. Схемы разломов при землетрясении:

а – нормальный сброс, б – обращенный сброс, в – поперечный сброс

В очаге землетрясения выделяется точка, в которой начинается разрушение земной породы, именуемая гипоцентром. Проекция гипоцентра на земную поверхность называется эпицентром. Возмущения грунтовой среды, порожденные в гипоцентре, распространяются во все стороны в виде упругих продольной (P) и поперечной (S) сейсмических волн. Взаимодействие этих волн с поверхностью земли возбуждает поверхностную волну (R). Схема распространения волн P , S , R в случае однородного грунтового полупространства показана на рис. 6 [13].

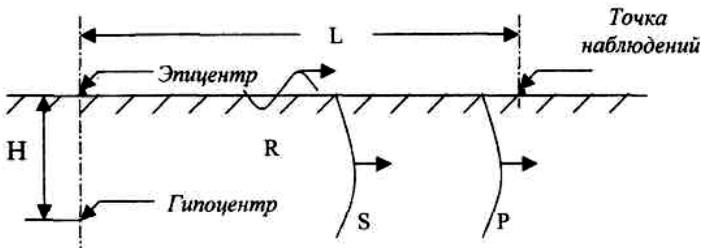


Рис. 6. Волновая картина при землетрясении

Согласно приведенным ранее в п. 1.6 пояснениям продольная волна P характеризуется объемными деформациями сжатия и разрежения. Частицы грунта совершают колебания в направлении, совпадающем с направлением распространения волн.

Поперечная волна S связана с деформациями сдвигового характера. Частицы грунта совершают колебания в направлении, перпендикулярном направлению распространения волн.

В поверхностной волне R частицы грунта совершают колебания по эллиптическим орбитам в вертикальной плоскости.

Скорости распространения продольной и поперечной волн определяются по соотношениям (1.33). Скорость распространения поверхностной волны составляет $\sim 0,9$ от скорости поперечной волны.

В дальнейшем будем обозначать скорости распространения волн P , S , R через N_P , N_S , N_R соответственно. С учетом соотношений (1.33) и (1.25) можно получить [13]:

$$\begin{aligned} N_P &= \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \text{ м/с,} \\ N_S &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \text{ м/с,} \\ N_R &= 0,9N_S, \end{aligned} \quad (1.40)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м³; E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона.

Значения ρ , E , ν для некоторых грунтов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения плотности грунта, модуля Юнга, коэффициента Пуассона

Грунт	E , Па	ν	ρ , кг/м ³
Гранит	$(3,5...5) \cdot 10^{10}$	0,1...0,15	$(2,5...3) \cdot 10^3$
Известняк	$3,5 \cdot 10^{10}$	0,2	$2,3 \cdot 10^3$

Пример. Определить скорость распространения продольной, поперечной и поверхностной волн по скальному грунту (гранит $\rho=2,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $E=5 \cdot 10^{10}$ Па; $\nu=0,15$).

Решение. 1. Скорость распространения продольной волны вычисляем по первой формуле системы (1.40):

$$N_p = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{10} \cdot (1 - 0,15)}{2,5 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0,15) \cdot (1 - 2 \cdot 0,15)}} = 4,6 \cdot 10^3, \text{ м/с.}$$

2. Скорость распространения поперечной волны находим по второй формуле (1.40):

$$N_s = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0,15)}} = 2,95 \cdot 10^3, \text{ м/с.}$$

3. Скорость распространения поверхностной волны определяем по соотношению (2):

$$N_R = 0,9 \cdot 2,95 \cdot 10^3 = 2,66 \cdot 10^3, \text{ м/с.}$$

Большие скорости распространения сейсмических волн создают значительные трудности с оповещением населения о факте землетрясения.

Пример. Оценить возможность оповещения жителями одного населенного пункта жителей другого населенного пункта о землетрясении, если первый из них расположен непосредственно в окрестности эпицентра землетрясения, второй – на расстоянии $L=100$ км от эпицентра. Глубина очага землетрясения $H=20$ км (величины L , H соответствуют рис. 6). Условия распространения сейсмических волн такие же, как и в рассмотренном выше примере.

Решение: 1. Находим время прихода первой из сейсмических волн – продольной волны P к первому населенному пункту:

$$t_1 = \frac{H}{N_p} = \frac{20 \text{ [км]}}{4,6 \text{ [км/с]}} = 4,3 \text{ с.}$$

2. Вычисляем время прихода этой волны ко второму населенному пункту:

$$t_2 = \frac{\sqrt{H^2 + L^2}}{N_p} = \frac{\sqrt{20^2 + 100^2} \text{ [км]}}{4,6 \text{ [км/с]}} = 22,2 \text{ с.}$$

3. Находим разность времени $\Delta t = t_2 - t_1$, определяющую возможность оповещения:

$$\Delta t = 22,2 \text{ с} - 4,3 \text{ с} = 17,9 \text{ с}.$$

За такое время оповестить население и принять необходимые меры по защите исключительно сложно.

Как известно, земная кора состоит из различных грунтовых работ, залегающих, как правило, послойно. При наличии неоднородных слоев, что, как правило, имеет место в реальной действительности, волновая картина при землетрясении существенно усложняется. Особенность распространения сейсмических волн состоит в том, что при косом падении на границу раздела двух сред волны одного типа, например P , возникают, кроме преломленной (PP_+) и отраженной (P_-) продольных волн, преломленная (PS_+) и отраженная (PS_-) поперечные волны (рис. 7).

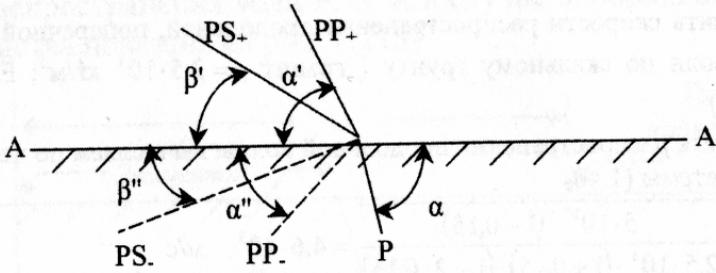


Рис. 7. Схема преломления продольной волны из одного грунтового слоя в другой

Положение фронтов волн PP_+ , PP_- , PS_+ , PS_- определяется по закону Снеллиуса:

$$\frac{N_P}{\sin \alpha} = \frac{N_{PP_+}}{\sin \alpha'} = \frac{N_{PS_+}}{\sin \beta'} = \frac{N_{PP_-}}{\sin \alpha''} = \frac{N_{PS_-}}{\sin \beta''}, \quad (1.41)$$

где $N_P, N_{PP_+}, N_{PS_+}, N_{PP_-}, N_{PS_-}$ – скорости распространения волн $P, PP_+, PS_+, PP_-, PS_-$ соответственно (находятся по формулам (1.40));

α – угол падения фронта волны P на границу раздела сред;

α', β' – углы преломления волн PP_+, PS_+ соответственно;

α'', β'' – углы отражения волн PP_-, PS_- соответственно.

Обычно плотность грунта и скорости распространения волн в верхнем слое меньше, чем в нижнем. В этом случае при косом падении продольной волны P_+ на границу AA' в верхнем слое в результате преломления формируются PP_+ , PS_+ волны. При их отражении от границы BB' верхнего слоя образуются волны PPP_- , PPS_- , PSP_- , PSS_- . Здесь индекс (+) при обозначении волн соответствует волне сжатия, индекс (-) – волне разрежения. При отражении волн PPP_- , PP_- , PS_- , PS_- от нижней границы AA'' верхнего слоя формируется следующая группа волн и т.д. Волновая система, формирующаяся в верхнем слое двухслойной грунтовой среды при распространении сейсмических волн P и S , показана на рис. 8 (с целью упрощения рисунка отраженные и преломленные волны в нижнем слое здесь не показаны) [13].

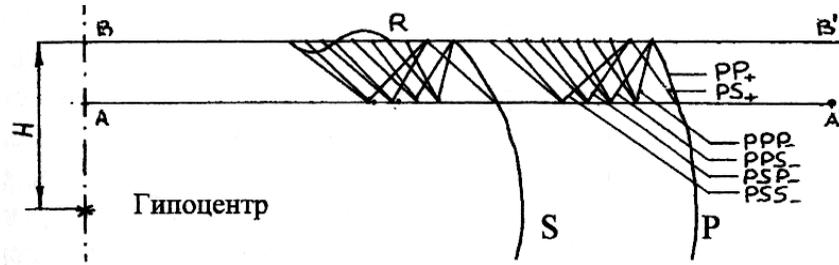


Рис. 8. Сейсмические волны в двухслойной среде

Таким образом, при наличии неоднородных слоев при землетрясении имеет место сложная волновая картина. В приповерхностном слое рассмотренные продольная и поперечная волны представляют собой по существу волновые пакеты, состоящие каждый из целой группы различных волн.

На рис. 9 показаны в качестве примера изменения во времени ускорения, скорости и смещения грунта при землетрясении 9.02.1971 года в Сан-Фернандо (штат Калифорния, США) [11].

На этом рисунке запись ускорения, то есть акселерограмма, первична; скорость и смещение грунта получены интегрированием. Обращает внимание отличие вида колебаний ускорения, скорости и смещения грунта, имевших место при этом землетрясении. Данное обстоятельство связано с наложением высоких гармоник колебаний от отдельных волн на основное колебание грунта, обусловленное волновым пакетом. Известно, что скорость можно рассматривать как первый интеграл по времени от ускорения, смещение – второй. При интегрировании высокие гармоники сглаживаются. Полученные таким

способом значения скорости и смещения грунта отвечают реальному характеру движения грунта при рассматриваемом землетрясении.

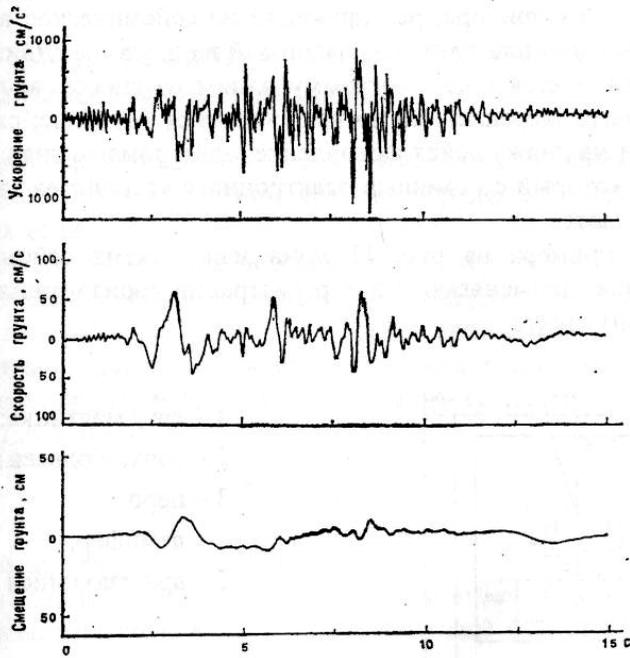


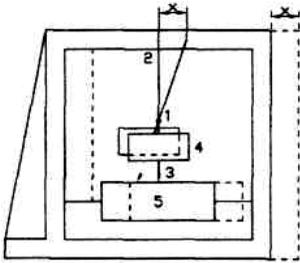
Рис. 9. Значение ускорения, скорости и смещения грунта при землетрясении в Сан-Фернандо в 1971 г.

Параметры движения грунта при землетрясении регистрируются на сейсмических станциях с помощью специальных приборов – сейсмографов и акселерографов.

Движение грунта в любой точке происходит в трех измерениях. Это означает, что точка движется в пространстве, а не просто в плоскости или по прямой. Чтобы зарегистрировать такое движение, сейсмограф должен иметь три сейсмометра, движущихся в трех взаимно перпендикулярных направлениях (двух горизонтальных и одном вертикальном) и позволяющих получить соответствующие сейсмограммы. Сейсмометр – это чувствительный элемент прибора, реагирующий на сейсмическое воздействие. Обычно это маятник или груз, закрепленный на пружине. Движение сейсмографа преобразуется в сейсмограмму одним из способов: перо чертит линию на бумаге, закрепленной на вращающемся барабане; световой луч оставляет след

на движущейся фотопленке; электромагнитная система генерирует ток, который с помощью электронного устройства записывается на магнитной карте.

В качестве примера на рис. 10 приведена схема сейсмографа маятникового типа, применяемого для регистрации горизонтальных смещений (колебаний) грунта.



- 1 – груз маятника;
- 2 – точка подвеса маятника;
- 3 – перо;
- 4 – демпфер;
- 5 – вращающийся барабан.

Рис. 10. Схема сейсмографа

Принцип действия сейсмографа. При смещении земной поверхности, например, слева направо на величину x , на эту же величину вместе с корпусом прибора сместятся точка подвеса маятника (2) и барабан (5). Груз (1) в первый момент времени остается неподвижным. Это вызывает отклонение маятника относительно вертикали, и перо прочертит на барабане определенную линию.

Сейсмограф регистрирует смещение грунта. Для регистрации ускорения грунта используются другие приборы – акселерографы. Чувствительный элемент этих приборов называется акселерометром, полученная запись – акселерограммой.

Основные параметры сейсмических волн (скорость распространения волн, ускорение, скорость и величина смещения грунта, продолжительность действия) зависят от энергии землетрясения, глубины очага и удаления точки наблюдения от эпицентра, а также физико-механических свойств грунта: плотности, модуля Юнга, коэффициента Пуассона.

Из соотношения (1.39) видно, что для определения энергии землетрясения необходимо знание размеров очага и величин напряжений в очаге, которые в свою очередь зависят от его глубины; в целом – это достаточно сложная задача.

Ниже рассматривается способ определения энергии землетрясений, предложенный американским сейсмологом Рихтером.

1.8. Магнитуда землетрясения. Связь магнитуды с энергией землетрясения

При сильных землетрясениях в очаге выделяется большое количество энергии. Энергию землетрясений обычно определяют через параметры сейсмических волн.

Для сравнительной оценки энергии землетрясений Рихтер предложил использовать специальную величину – магнитуду. Магнитуда (от лат. *magnitudo* – величина и *magnus* – большой) – величина, характеризующая общую энергию упругих колебаний, вызываемых землетрясением, находится как десятичный логарифм от смещения грунта на определенном расстоянии ($L = 100$ км):

$$M = \lg \frac{A}{A_0}, \quad (1.42)$$

где M – магнитуда землетрясения; A – смещение грунта при рассматриваемом землетрясении; A_0 – смещение грунта при очень слабом землетрясении, принятом за начало отсчета.

Энергия землетрясения связана с магнитудой соотношением

$$\lg Q = \alpha + \beta M, \quad (1.43)$$

где Q – энергия землетрясения, Дж; α , β – эмпирические коэффициенты.

При пользовании этим соотношением принимают значения коэффициентов $\alpha = 5,32$, $\beta = 1,42$, хотя отмечается, что в различных регионах они могут варьироваться в определенных пределах.

Соотношения (1.43) можно представить в виде

$$Q = 10^{5,32+1,42M}, \text{ Дж.} \quad (1.44)$$

Если энергию Q выражать в эргах (1 Дж = 107 эрг), величину $k = \lg Q$ называют энергетическим классом землетрясения. По Рихтеру магнитуда тектонических землетрясений составляет $0 < M < 9$.

Измерение смещений грунта Рихтером производилось с помощью короткопериодных крутильных сейсмографов Вуда-Андерсона с увеличением до 2800 раз. В последнее время с появлением более чувствительных сейсмографов зарегистрированы еще более слабые землетрясения магнитудой до $M = -3$. Чтобы фиксировать такие землетрясения, приборы записывают движение грунта с увеличением до 80000 раз.

Магнитуду землетрясения вычисляют на сейсмических станциях по величине максимальной амплитуды записи смещения грунта на сейсмограмме с учетом расстояния от эпицентра до станции и глубины очага. Координаты эпицентра и глубину очага находят при известных значениях N_p , N_s по временам прихода волн к нескольким станциям.

На каждой сейсмической станции имеются специальные методики для определения магнитуды, доведенные до программ для ЭВМ и номограмм.

Когда происходит землетрясение, обработав сейсмограмму и зная эпицентральное расстояние, обращаются к ЭВМ или номограммам.

В упрощенном виде процедура расчета показана на рис. 11, построенном для некоторой конкретной станции [2].



Рис. 11. Номограмма для определения магнитуды

Пример. Определить магнитуду землетрясения, если амплитуда смещения на сейсмограмме составляет 20 мм, расстояние от эпицентра до сейсмической станции 300 км.

Решение. Соединяем пунктирной линией точку 20 мм на первой шкале с точкой 300 км на третьей шкале. На средней шкале считываем значение магнитуды $M = 5,4$.

Зная магнитуду, по формуле (1.44) нетрудно вычислить энергию землетрясения.

При неглубоких землетрясениях на поверхности Земли часто наблюдаются тектонические подвижки. Известны предложения по оценке энергии таких землетрясений через величины остаточных деформаций в эпицентральной области. Предложенные соотношения имеют вид [11]

$$\begin{aligned}
 M &= c_1 + d_1 \lg L; \\
 M &= c_2 + d_2 \lg B; \\
 M &= c_3 + d_3 \lg D;
 \end{aligned}
 \tag{1.45}$$

$$\begin{aligned}
 M &= c_4 + d_4 \lg(LB); \\
 M &= c_5 + d_5 \lg(LD); \\
 M &= c_6 + d_6 \lg(LBD).
 \end{aligned}
 \tag{1.46}$$

В соотношениях (1.45), (1.46) величина L – это длина разлома, B – относительное смещение (горизонтальное или вертикальное), D – ширина разлома, произведение $kLBD$ – сейсмический момент, где k – жесткость (в последнем соотношении величина k учитывается значением коэффициента d_6).

Коэффициенты $c_1, c_2 \dots c_6, d_1, d_2 \dots d_6$ определяются экспериментально. Соотношения (1.45), (1.46) широкого распространения не получили из-за недостатка достоверных данных.

1.9. Интенсивность землетрясений. Шкалы MSK-64 и Рихтера

Еще сотни лет назад интенсивность землетрясения оценивалась по размерам причиненного им ущерба. Если одно землетрясение разрушало больше населенных пунктов, приносило больше человеческих жертв, чем другое, его считали более сильным. Однако такой подход носит качественный характер. Ведь разрушение различных зданий, сооружений связано с воздействием сейсмических волн, параметры которых в свою очередь зависят от энергии землетрясения, глубины очага и удаления объекта от эпицентра. Тем не менее, и в настоящее время степень ущерба в определенном месте часто называют интенсивностью землетрясения. Интенсивность, приписываемая конкретному землетрясению без указания места наблюдений, – это обычно максимальная интенсивность, наблюдаемая при этом землетрясении. Интенсивность землетрясения оценивается в баллах (J балл).

Для сравнения землетрясений по их интенсивности разработан ряд специальных цифровых шкал. Среди первых следует отметить шкалу, предложенную в 1902 г. в Италии Меркалли Д. В 1931 г. она была пересмотрена и модернизирована в США Вудом Г. и Ньюманом Ф. и

получила название модифицированная шкала Меркалли (ММ). В нашей стране интенсивность землетрясения оценивается по 12-балльной шкале согласно ГОСТ 6249-52. Используется также шкала института Физики Земли (ИФЗ), положенная в основу СНиП 11-7-81 «Строительство в сейсмических районах». ЮНЕСКО рекомендовало использовать в качестве международной шкалы – шкалу MSK-64, названную по фамилиям предложивших ее сейсмологов: Медведева С. из СССР, Шпонхойера В. из ГДР и Карника В. из ЧСР. Шкалы ММ, ИФЗ, MSK-64 близки между собой. В этих шкалах интенсивность землетрясения в баллах сопоставляется с параметрами движения грунта, дается оценка последствий. Имеются и другие шкалы [2], [14], [15].

Отдельно необходимо остановиться на шкале Рихтера, позволяющей оценить энергию землетрясения. Следует отметить, что в средствах массовой информации (СМИ) интенсивность землетрясения часто оценивают в баллах по шкале Рихтера. Шкала Рихтера – это шкала магнитуд, баллы этой шкалы – величина магнитуды. При известной магнитуде энергия землетрясения находится по формуле (1.44).

В табл. 3 приводятся основные данные шкалы MSK-64, рекомендованной к использованию ЮНЕСКО.

Таблица 3

Шкала MSK-64 интенсивности землетрясений

Балл	Землетрясение	Параметры движения грунта			Последствия
		Ускорение \ddot{W} /g	Скорость \dot{W} ,см/с	Смещение W, мм	
1	2	3	4	5	6
1	Незаметное	0,001-0,002	0,06-0,12	0,03-0,06	Ощущается только приборами
2	Очень слабое	0,002-0,003	0,12-0,25	0,06-0,12	Ощущается отдельными людьми на верхних этажах домов
3	Слабое	0,003-0,006	0,25-0,5	0,12-0,25	Ощущается некоторыми людьми в помещениях. Слабое покачивание висячих предметов
4	Умеренное	0,006-0,012	0,5-1,0	0,25-0,5	Ощущается в помещениях многими, а вне помещений - немногими людьми. Отмечается вибрация, такая же, как от проходящего мимо грузовика.

1	2	3	4	5	6
5	Среднее	0,012-0,025	1-2	0,5-1,0	Общее сотрясение зданий, сдвиги мебели. Трещины в штукатурке, оконных стеклах. Пробуждение спящих.
6	Сильное	0,025-0,05	2-4	1-2	Ощущается всеми, многие люди напуганы. Картины падают со стен, откалываются куски штукатурки, легкие повреждения зданий.
7	Очень сильное	0,05-0,1	4-8	2-4	Повреждаются здания; трещины в стенах каменных домов, выпадают кирпичи, штукатурка; ломается мебель. Людям трудно стоять на ногах.
8	Разрушительное	0,1-0,2	8-16	4-8	Частичное разрушение плохо построенных зданий; падают дымовые трубы и карнизы; обрушиваются лестницы и пролеты.
9	Опустошительное	0,2-0,4	16-32	8-16	Общая паника. Разрушаются каменные здания. Лопаются подземные трубопроводы. Большие трещины в грунте.
10	Уничтожающие	0,4-0,8	32-64	16-32	Общее разрушение зданий. Происходят большие оползни. Серьезные повреждения плотин, набережных и т. д.
11	Катастрофа	0,8-1,6	64-128	32-64	Катастрофические разрушения. Подземные трубопроводы полностью выходят из строя; рельсы сильно искривляются.
12	Сильная катастрофа	>1,6	>128	>64	Значительное изменение ландшафта смещение крупных скальных массивов многочисленные трещины, обвалы, оползни. Возникновение водопадов, подпруд, отклонение течения рек. Ни одно сооружение не выдерживает.

Примечание: $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Согласно этой таблице кинематические параметры грунта в практически важном диапазоне интенсивностей $6 < J < 10$ баллов возрастают по закону геометрической прогрессии с основанием, равным двум [15]:

$$\dot{W}_J = \ddot{W}_6 \cdot 2^{J-2}; \quad \dot{W}_J = \dot{W}_6 \cdot 2^{J-6}; \quad W_J = W_6 \cdot 2^{J-6}, \quad (1.47)$$

где \ddot{W} , \dot{W} , W – ускорение, скорость и смещение грунта соответственно.

Ускорение грунта в зависимости от интенсивности землетрясения оценивается по соотношению

$$\frac{\ddot{W}}{g} = \alpha \cdot 2^{J-6}, \quad (1.48)$$

где коэффициент $\alpha \approx 0,025 \dots 0,05$.

Согласно данным [11, 16] периоды колебаний земной поверхности при сильных землетрясениях составляют 0,3...0,8 с и более.

Как отмечалось, интенсивность землетрясения в точках на поверхности земли зависит от выделенной в очаге энергии, глубины очага и удаления от эпицентра.

Максимальная интенсивность землетрясения имеет место в эпицентре [11], [14]:

$$J_0 = C_1 \cdot M - C_2 \lg H + C_3, \quad (1.49)$$

где J_0 – интенсивность землетрясения в эпицентре, балл; M – магнитуда; H – глубина очага, км.

Среднее значение коэффициентов: $C_1 = 1,5$; $C_2 = 3,5$; $C_3 = 3,0$.

Очаги землетрясений возникают на различных глубинах. Большая их часть формируется в земной коре на глубинах порядка 20...30 км. В некоторых районах, особенно в зонах субдукции, они отмечались и в верхней мантии на глубинах 300.. .400 км и более.

При отсутствии данных о глубине очага в приближенных расчетах для оценки величины J_0 допускается использовать зависимость

$$J_0 = 1,5M - 1,5,$$

которую считают близкой к средней по всему земному шару для неглубоких землетрясений ($H \approx 20$ км).

Интенсивность землетрясения уменьшается с увеличением расстояния L от эпицентра. Рихтер и Гуттенберг предположили следующую формулу для определения интенсивности землетрясения на различных расстояниях $L > H$ [11]:

$$J = J_0 - 6 \lg \frac{\sqrt{L^2 + H^2}}{H} + \Delta, \quad (1.50)$$

где J – интенсивность землетрясения на расстоянии L , км, от эпицентра, балл; Δ – поправка, учитывающая особенности местных геологических условий; величины J_0 , H имеют то же значение, что и в формуле (1.49).

Формула (1.50) была получена применительно к условиям скального грунта. Позднее введена поправка, учитывающая влияние местных геологических условий. Значения этой поправки принимаются равными: $\Delta = 0$ для скального грунта, $\Delta = 0 \div 1$ балла для песчаников и известняков, $\Delta = 1$ балл для умеренно прочных пород, $\Delta = 1 \div 2$ балла для песчаных грунтов и глинистых толщ, $\Delta = 2 \div 3$ балла для рыхлых насыпных грунтов.

Следует отметить, что в ряде стран для определения величины J используются зависимости, несколько отличные от зависимости (1.50), тем не менее, в расчетах, носящих оценочный характер, применение этой формулы допустимо.

Применительно к условиям нашей страны в приближенных расчетах допускается использовать соотношение [14], [15]

$$J = J_0 - 3,5 \lg \frac{\sqrt{L^2 + H^2}}{H}. \quad (1.51)$$

Здесь под величиной J подразумевается осредненное значение интенсивностей землетрясения по различным направлениям на одном и том же расстоянии L от эпицентра, а величины J_0 , L , H имеют тот же смысл, что и в формуле (1.50). При необходимости влияние местных геологических условий на величину J учитывается дополнительно.

1.10. Оценка воздействия землетрясения на различные объекты

Характер воздействия землетрясений на различные объекты часто оценивают по величине максимального ускорения грунтового основания при прохождении сейсмических волн.

Данное положение опирается на второй закон Ньютона:

$$F = m \cdot \ddot{w},$$

где F – сила, действующая на сооружение; m – масса сооружения; \ddot{w} – ускорение.

Тем не менее, оценка воздействия землетрясения на объекты только по величине ускорения не всегда корректна. Более того, она может привести к неверным результатам. Известно, например, что при прохождении вблизи зданий тяжелых грузовиков, а также при работе быстроходных агрегатов вибрации основания не вызывают разрушений, хотя ускорения достигают значения нескольких g ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$). В то же время такие ускорения при землетрясениях привели бы к катастрофическим последствиям (см. табл. 3). При оценке воздействия землетрясения, кроме величины \ddot{w} , необходимо знать время действия сейсмической нагрузки, а также соотношение между периодом колебаний грунта T при прохождении сейсмических волн и периодом собственных колебаний конструкции T_0 [16].

В целом определение воздействия землетрясения на здания, сооружения – это сложная инженерная задача. Её решение приводится в специальных разделах строительной механики. Для получения представления о характере движения сооружения при прохождении сейсмических волн рассмотрим несколько простейших случаев колебаний системы с одной степенью свободы – массы, закрепленной на пружине (рис. 12) [17].

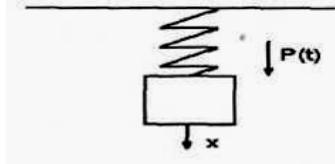


Рис. 12. Груз на пружине

При отсутствии переменных во времени внешних сил уравнение движения массы m записывается в виде

$$M \cdot \ddot{x} + k \cdot x = 0, \quad (1.52)$$

или

$$\ddot{x} + \lambda^2 x = 0, \lambda^2 = \frac{k}{m}.$$

Здесь величина $\lambda = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – это частота свободных колебаний системы, величина k – жесткость пружины, представляющая собой

коэффициент пропорциональности между величиной удлинения (сжатия) пружины и величиной усилия, вызвавшего данное удлинение - сжатие (своего рода аналог модуля Юнга).

Решение уравнения (1.52) имеет вид

$$x = A \sin \lambda t + B \cos \lambda t, \quad (1.53)$$

где A, B – постоянные, определяемые из начальных условий.

Если при $t = 0 \Big|_{x=x_0}, \dot{x} = \dot{x}_0$, тогда

$$x = \frac{\dot{x}_0}{\lambda} \sin \lambda t + x_0 \cos \lambda t = C \sin(\lambda t + Q), \quad (1.54)$$

где $C = \sqrt{x_0^2 + \frac{\dot{x}_0^2}{\lambda^2}}, Q = \arctg \frac{\lambda x_0}{\dot{x}_0}$.

Зависимость (1.54) показывает, что рассматриваемое движение является гармоническим колебанием около положения статического равновесия.

Частота свободных колебаний λ и период колебаний $\tau = \frac{2\pi}{\lambda}$ не зависят от начальных условий и, следовательно, от амплитуды.

Пусть на массу m действует произвольная сила $P(t)$ (рис. 12). Тогда уравнение движения массы запишется в виде

$$\ddot{x} + \lambda^2 \cdot x = \frac{P(t)}{m}. \quad (1.55)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$x = x_1 + \int_0^{t^*} P(\xi) \sin \lambda(t - \xi) d\xi. \quad (1.56)$$

Здесь x_1 отвечает свободным колебаниям системы (1.54). Время $t^* = t$ при $t < T$ и $t^* = T$ при $t > T$, где T – время действия силы $P(t)$.

Пусть сила $P(t)$ гармоническая, то есть $P(t) = P_0 \sin \omega t$. Тогда решение (1.56) примет вид

$$\begin{aligned}
 x &= x_1 + \frac{P_0}{m\lambda} \int_0^t \sin \omega \xi \cdot \sin \lambda(t - \xi) = \\
 &= x_1 + \frac{P_0}{m \cdot \lambda^2 \left[1 - \left(\frac{\omega}{\lambda} \right)^2 \right]} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\lambda} \sin \lambda t \right), \quad (1.57)
 \end{aligned}$$

где x_1 – свободные колебания системы;

$\frac{P_0}{m \cdot \lambda^2} = \frac{P_0}{k} = x_{\text{ст}}$ – величина статической деформации упругой связи, соответствующая силе P_0 .

Решение (1.57) показывает, что движение системы под действием непрерывной гармонической силы складывается из двух гармонических колебаний: одного с частотой свободных колебаний λ , другого – с частотой возмущающей силы ω [17].

Основные следствия:

1. Если $\frac{\omega}{\lambda} \rightarrow 0$, то есть если частота возмущающей силы мала по сравнению с частотой свободных колебаний, то наибольшая амплитуда вынужденных колебаний оказывается равной $x_{\text{ст}}$.

2. Если $\frac{\omega}{\lambda} \rightarrow \infty$, то есть если частота возмущающей силы велика по сравнению с частотой свободных колебаний, то действие силы на систему становится пренебрежительно малым.

3. Если $\frac{\omega}{\lambda} = 1$, то амплитуда колебаний теоретически становится бесконечно большой. Такое колебание называется состоянием резонанса.

В более сложном случае движения системы с одной степенью свободы при наличии сил сопротивления, пропорциональных скорости перемещения, уравнение движения имеет вид

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \lambda^2 \cdot x = \frac{P(t)}{m}, \quad (1.58)$$

где $2n$ – параметр сопротивления.

Подстановкой $u = xe^{nt}$ его можно упростить:

$$\ddot{u} + \lambda_*^2 u = \frac{P(t)}{m} e^{nt},$$

где $\lambda_*^2 = \lambda^2 - n^2$.

Для последнего уравнения согласно выражению (1.56) решение записывается в виде

$$u = u_1 + \frac{1}{m \cdot \lambda_*} \int_0^{t^*} P(\xi) e^{n\xi} \sin \lambda_* (1 - \xi) d\xi,$$

или, возвращаясь к переменной x , находим

$$x = x_1 + \frac{e^{-m}}{m \sqrt{\lambda^2 - n^2}} \int_0^{t^*} P(\xi) e^{n\xi} \sin \left[\sqrt{\lambda^2 - n^2} (t - \xi) \right] d\xi, \quad (1.59)$$

где x_1 – свободные колебания.

Колебания x_1 вычисляются по соотношению

$$x_1 = e^{-nt} (A \sin \lambda_* t + B \cos \lambda_* t) = C e^{-nt} \sin(\lambda_* t + Q),$$

где A, B, C, Q – постоянные, определяемые из начальных условий.

Если возмущающая сила гармоническая, $P(t) = P_0 \sin(\omega t + Q_0)$, частное решение уравнения (1.58), то есть установившиеся колебания, можно искать в виде

$$x = A_1 \sin(\omega t + Q_0) + B_1 \cos(\omega t + Q_0). \quad (1.60)$$

Подстановка этого решения в уравнение (1.58) и сравнение коэффициентов при одинаковых тригонометрических функциях времени приводят к следующим соотношениям:

$$A_1 = \frac{P_0}{M} \cdot \frac{\lambda^2 - \omega^2}{(\lambda^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \cdot \omega^2}, \quad (1.61)$$

$$B_1 = -\frac{P_0}{m} \cdot \frac{2n\omega}{(\lambda^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}.$$

Вместо (1.60) можно пользоваться зависимостью

$$x = C_1 \sin(\omega t + Q_0 - Q_*), \quad (1.62)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{P_0}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-z^2)^2 + 4\gamma^2 z^2}} = \frac{P_0}{k} \cdot x;$$

$$Q_* = \arcsin \frac{2\gamma z}{\sqrt{(1-z^2)^2 + 4\gamma^2 z^2}}, \quad z = \frac{\omega}{\lambda}, \quad \gamma = \frac{n}{\lambda}.$$

Следует отметить, что при наличии сопротивления коэффициент χ , называемый коэффициентом динамичности, всегда остается конечным, так как подкоренное выражение $(1-z^2)^2 + 4\gamma^2 z^2$ никогда не обращается в ноль [17]. Максимальное значение χ составляет:

$$\chi_{\max} = \frac{1}{2\gamma\sqrt{1-\gamma^2}} \quad \text{при } z = \sqrt{1-2\gamma^2}.$$

При оценке воздействия землетрясения на различные объекты важное значение имеет связь между движением грунта и движением данного сооружения, при этом необходимо знать спектр реакции сооружения на входное воздействие. В приближенных расчетах обычно определяют спектр реакции осциллятора с одной степенью свободы и вязким затуханием согласно уравнению [11]

$$\ddot{x} + 2\lambda n_* \dot{x} + \lambda^2 x = a(t), \quad (1.63)$$

где x – относительное смещение; λ – собственная частота; n_* – параметр вязкого затухания (сопротивления); $a(t)$ – ускорение грунта, определяемое акселерограммой.

Видно, что при $\lambda \cdot n_* = n$, $a(t) = \frac{p(t)}{m}$ данное уравнение приводится к виду (1.58). Следовательно, полученные выше рекомендации применимы и к рассматриваемому случаю движения (1.63).

Зная массу и частоту собственных колебаний здания, физико-механические свойства и параметры движения грунтового основания при распространении сейсмических волн, по уравнению (1.63) можно оценить (в приближении одномерной модели движения) параметры движения здания – x, \dot{x}, \ddot{x} .

Следует отметить, что в этом уравнении под собственной частотой сооружения подразумеваются свободные колебания здания на грунтовом основании.

В нашей стране важные результаты по определению воздействия землетрясения на различные объекты получены группой ученых ИФЗ под руководством академика М.А. Садовского. Одновременно ими разработаны приближенные методы, позволяющие учесть особенности воздействия сейсмических волн различной продолжительности и дать достоверную оценку общего характера разрушения объекта [16].

Установлено, что при $T \gg T_0$, где T – период колебаний грунта при прохождении сейсмических волн, T_0 – период собственных колебаний сооружения, сооружение будет колебаться с амплитудой, мало отличающейся от амплитуды колебаний грунтового основания. Данный результат находится в соответствии с первым следствием решения (1.57). В этом случае поражение объекта определяется величиной ускорения грунтового основания (с учетом значений скорости и смещения грунта, табл. 3).

Соотношение $T \gg T_0$ имеет место при сильных землетрясениях. Как отмечалось ранее, при землетрясениях величина T составляет 0,3...0,8 с и более [11], [16]. Величина T увеличивается с возрастанием магнитуды землетрясения.

Период собственных колебаний зданий допустимо оценивать по соотношению

$$T_0 = \eta N, \quad (1.64)$$

где $\eta = (0,04...0,08)$ – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств грунтового основания; N – число этажей здания.

М.А. Садовским установлено также, что при соотношении времен $T < T_0$ амплитуда колебаний сооружения существенно меньше амплитуды колебания грунтового основания (данный вывод находится в соответствии со вторым следствием решения (1.57)). Выяснено, что в данном случае, то есть при $T < T_0$, повреждения зданий, сооружений происходят лишь тогда, когда скорость колебаний грунта превосходит некоторую критическую величину. Например, для жилых типовых

зданий величина критической скорости составляет $10 \div 14$ см/с. Колебания грунта со скоростью, большей этой величины, вызывают серьезные повреждения зданий. Таким образом, поражающее действие сейсмических волн относительно малой продолжительности определяется величиной скорости грунтовых колебаний.

Критерий $\dot{w} = 10 \div 14$ см/с близок к данным Горного бюро США. Согласно американским данным колебания грунта с максимальной скоростью ниже 5 см/с будут безопасными, при $5 \text{ см/с} < \dot{w} < 10 \text{ см/с}$ повреждения будут незначительными, а серьезные повреждения – при $\dot{w} > 19 \text{ см/с}$ [18].

В приближенных расчетах для оценки воздействия землетрясения на различные объекты пользуются данными табл. 4, полученными на базе теоретических исследований и анализа фактических материалов последствий землетрясений. Эти данные можно рассматривать как критерии поражения [13-15].

Таблица 4

Зависимость степени разрушения зданий, сооружений от интенсивности землетрясения

Сооружение	Интенсивность землетрясения J , балл		
	Степень разрушения объектов		
	Слабое	Среднее	Сильное
Промышленное здание с тяжелым металлическим (или железобетонным) каркасом	7-8	8-9	9-10
Промышленное здание с легким металлическим каркасом и здании бескаркасной конструкции	6-7	7-8	8-9
Многоэтажное кирпичное здание (> 3)	6	6-7	7-8
Малозэтажное кирпичное здание (< 3)	6-7	7	7-8
Внутренние стены:			
Железобетонные (гипсобетонные)	6	7	7,5
Деревянные	5	6	7
Деревянный дом	5-6	6	6,5 - 7,5
Остекление:			
Из обычного стекла	3	4	5
Из стеклоблоков	5-6	6-7	7-7,5

Пример. Оценить воздействие землетрясения на отдельно стоящее промышленное здание с легким металлическим каркасом, расположенное на расстоянии 60 км от эпицентра. Магнитуда землетрясения $M = 7$, глубина очага землетрясения 10 км, грунт – песчаные и глинистые толщи (поправка $\Delta = 2$ балла).

Решение: 1. По формуле (1.49) находим интенсивность землетрясения в эпицентре:

$$I_0 = 1,5 \cdot 7 - 3,5 \lg 10 + 3 = 10 \text{ баллов.}$$

Согласно табл. 3 такое землетрясение называется уничтожающим.

2. Интенсивность землетрясения на расстоянии 60 км определяем по формуле (1.50):

$$I = 10 - 6 \lg \frac{\sqrt{60^2 + 10^2}}{10} + 2,5 = 7,3 \text{ балла.}$$

3. Согласно табл. 4 при интенсивности землетрясения 7,3 балла разрушение здания оценивается как среднее.

Случай близких значений T и T_0 особый. Воздействие колебаний грунтового основания на здание, сооружение в этих условиях предлагается учитывать введением коэффициента динамичности χ , который учитывает, во сколько раз может увеличиться интенсивность (амплитуда) колебаний:

$$\chi = \left[1 - \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 + \left(\mu \frac{T}{T_0} \right)^2 \right]^{-0,5}, \quad (1.65)$$

где μ – коэффициент затухания колебаний сооружения.

Величина μ редко бывает меньше 0,2. Следовательно, максимальное значение χ при $T = T_0$ может достигать 5. Данный результат находится в соответствии с соотношениями (1.62), согласно которым коэффициент динамичности при наличии сопротивления всегда остается конечным.

В соотношениях (1.64), (1.65) под собственными колебаниями здания, как и в уравнении (1.63), подразумеваются свободные колебания здания на грунтовом основании.

Соотношение $T < T_0$ наиболее характерно для случаев воздействия на сооружения сейсмозрывных волн, образующихся при подземных взрывах зарядов обычных взрывчатых веществ. Действие таких волн рассматривается в следующем параграфе.

1.11. Сейсмический эффект и местное действие взрыва

В связи с широким применением взрывчатых веществ (ВВ) в военном деле и практике строительных работ самостоятельный интерес представляет оценка сейсмического эффекта и местного действия взрыва. Местное действие взрыва включает в себя воронку взрыва, зоны разрушений, больших пластических деформаций и навала грунта. Под сейсмическим эффектом взрыва подразумевают действие сейсмозрывных волн, распространяющихся в грунтовой среде.

Необходимо отметить, что при наземном и воздушном взрывах основным поражающим фактором, определяющим разрушение и повреждения зданий, является воздушная ударная волна. Вместе с тем при оценке воздействия взрыва на особо прочные наземные объекты следует учитывать дополнительное действие сейсмического эффекта и местного действия взрыва. Последнее непосредственно относится также к оценке действия взрыва на подземные сооружения.

Кроме того, сейсмический эффект является основным поражающим фактором при подземных взрывах

При наземном взрыве обычных ВВ на грунтах типа суглинков, песок, глина размеры воронки – радиус $r_{\text{в}}$, м; глубина $h_{\text{в}}$, м; объём выброшенного грунта V , м³, – составляют [19]:

$$\begin{aligned} r_{\text{в}} &\approx 0,36\sqrt[3]{G}, \\ h_{\text{в}} &\approx 0,16\sqrt[3]{G}, \\ V &\approx 2,6\sqrt[3]{G}. \end{aligned} \quad (1.66)$$

В формулах (1.66) величина G – масса тротилового заряда, кг. При взрыве заряда другого химического ВВ под G следует подразумевать величину его тротилового эквивалента, рассчитываемого по соотношению

$$G = G_0 \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{вмп}}}, \quad (1.67)$$

где G_0 – масса рассматриваемого заряда, кг; $Q_{\text{в}}$, $Q_{\text{вмп}}$ – энергия взрыва данного ВВ и тротила соответственно, Дж/кг.

Значение Q таких распространенных ВВ, как аммотол, гексоген, нитроглицерин, октоген, тротил, тетрил, ТЭН составляют

соответственно 2,65; 5,36; 6,70; 5,86; 4,52; 4,52; 5,80 МДж/кг (1МДж = 10^6 Дж).

Радиусы зон разрушения r_p , больших пластических деформаций $r_{п.д}$ и навала грунта $r_{н.г}$ составляют:

$$\begin{aligned} r_p &\approx 1,5r_b, \\ r_{п.д} &\approx 2,5r_b, \\ r_{н.г} &\approx (2,5...4)r_b. \end{aligned} \quad (1.68)$$

В области воронки взрыва, зонах разрушения и больших пластических деформаций грунта обычно происходит полное разрушение высокопрочных объектов.

Значения r_b , r_p , $r_{п.д}$, $r_{н.г}$, V при ядерном взрыве приведены в литературе [20].

Представляется целесообразным сопоставить действие воздушной ударной волны наземного ядерного взрыва на жилые и промышленные здания с действием землетрясения. Такое сопоставление выполнено в табл. 5 [14].

Рекомендации по расчету давления во фронте воздушной ударной волны в зависимости от мощности взрыва и удаления точки наблюдения приведены в справочных пособиях [20, 21].

Так как при воздушном и наземном взрывах основным поражающим фактором, определяющим действие взрыва на наземные объекты, является воздушная ударная волна, ниже волновая система в грунте при таких взрывах не рассматривается.

Таблица 5

Степени разрушения зданий, сооружений в зависимости от величины избыточного давления во фронте воздушной ударной волны ΔP_{Φ} , кПа, и интенсивности землетрясения J , балл

Поражающий фактор	Степени разрушения			
	Слабое	Среднее	Сильное	Полное
ΔP_{Φ} , кПа	10 ÷ 20	20 ÷ 30	30 ÷ 50	> 50
J , балл	5 ÷ 6	7 ÷ 8	9 ÷ 10	> 10

Сейсмозрывные волны являются основным поражающим фактором при подземных взрывах. Система сейсмозрывных волн включает в себя продольную, поперечную и поверхностные волны. В приближенных расчетах оценка действия этих волн на наземные

объекты может быть проведена на основе рекомендаций предыдущего параграфа с учетом соотношения величин T и T_0 , где T – период колебаний грунта при прохождении волн, T_0 – период собственных колебаний сооружения. При взрывах ВВ обычно выполняется соотношение $T < T_0$.

Как отмечалось в предыдущем параграфе, при соотношении времен $T < T_0$ поражающее действие сейсмозрывных волн определяется величиной скорости грунтовых колебаний.

Следует отметить, что вследствие большого разнообразия физико-механических свойств грунтов, их послышного залегания оценка скорости колебаний грунта при распространении сейсмозрывных волн встречает определенные трудности. Кроме того, с изменением расстояния от центра взрыва максимальная скорость колебаний грунта может наблюдаться последовательно в различных волнах.

Ниже расчет максимальной скорости грунтовых колебаний проводится для определяющей по интенсивности волны.

На расстояниях $R/\sqrt[3]{G} \leq (10 \div 20)$ м/кг^{1/3} от центра подземного взрыва преобладающей по интенсивности обычно является продольная волна. Расчет максимальной скорости колебаний грунта в этой волне проводится по формуле [22]

$$W_{\max} = A \cdot \left(\frac{G^{1/3}}{R} \right)^2, \text{ см/с}, \quad (1.69)$$

где G – масса тротилового заряда, кг; R – расстояние от центра взрыва, м; A – коэффициент, зависящий от типа грунта.

Коэффициент A имеет значения: 1100 – для глин; 700 – для гранита, известняка, водонасыщенного песка; 70 ÷ 130 – для лёсса влажностью 2% и 5% соответственно. В случаях, когда тип грунта точно не установлен, приближенно принимают коэффициент $A = 700$.

При взрыве в песчаном грунте расчет скорости \dot{W}_{\max} проводится по формуле

$$\dot{W}_{\max} = 340 \cdot \left(\frac{G^{1/3}}{R} \right)^{1,8}, \text{ см/с}, \quad (1.70)$$

где значения G , R имеют тот же смысл, что и в формуле (1.69).

В приближенных расчетах формулы (1.69), (1.70) применяют при заглоблнениях заряда $H_3/\sqrt[3]{G} = (0,7 \div 2)$ м/кг^{1/3}. С уменьшением величины $H_3/\sqrt[3]{G} < 0,7$ м/кг^{1/3} значение \dot{W}_{\max} уменьшается (до нескольких раз). При таких заглоблнениях заряда расчет по этим формулам можно рассматривать как «оценку сверху». Взрывы на глубинах $H_3/\sqrt[3]{G} > 2$ м/кг^{1/3} производятся сравнительно редко (для решения специальных задач). При необходимости более точного определения скорости \dot{W}_{\max} при заглоблнениях заряда $H_3/\sqrt[3]{G} < 0,7$ м/кг^{1/3} и $H_3/\sqrt[3]{G} > 2$ м/кг^{1/3} можно воспользоваться рекомендациями [22].

На больших расстояниях наибольшую опасность представляет поверхностная волна.

При взрыве в грунте типа лёссовидный суглинок максимальная скорость колебания грунта, обусловленная этой волной, находится по формуле [22]

$$\dot{W}_{\max} = 40 \cdot \frac{G^{1/2}}{R^{1,21}}, \text{ см/с.} \quad (1.71)$$

При взрыве в скальном грунте

$$\dot{W}_{\max} = 40 \cdot \frac{G^{2/3}}{R^{1,52}}, \text{ см/м.} \quad (1.72)$$

Численные коэффициенты в последних двух формулах отвечают заглоблению заряда $0,7 \text{ м/кг}^{1/3} \leq H_3/\sqrt[3]{G} \leq 2 \text{ м/кг}^{1/3}$.

Периоды продольной T_p , с, и поверхностной T_R , с, волн определяются по соотношениям [22]

$$T_p = k_p \sqrt[6]{G}, \quad (1.73)$$

$$T_R = k_R \sqrt[6]{G \cdot \bar{R}^n}, \quad (1.74)$$

где величина $\bar{R} = R/\sqrt[3]{G}$, м/кг^{1/3} – расстояние от центра взрыва.

Значения коэффициентов k_p , k_R и показателя степени n в зависимости от типа грунта приведены в табл. 6 [22].

Для суглинки, как и для лёсса, значения $k_R = 0,06$, $n = 0,11$ [22].

Численные значения k_p , k_R , n в табл. 6 отвечают заглублениям заряда $0,7 \text{ м/кг}^{1/3} \leq H_3/\sqrt[3]{G} \leq 2 \text{ м/кг}^{1/3}$.

Таблица 6

Значения величин k_p , k_R , n

Грунт	k_p	k_R	n
Глина	0,04	0,08	0,11
Водонасыщенный песок	0,06	0,15	
Гранит	0,0128	0,0058	0,44
Мраморизованный известняк	0,0128	0,035	0,20
Лёсс влажностью 5%	0,068	0,06	0,11
Лёсс влажностью 2%	0,068	0,06	0,11

Пример. Оценить опасность подрыва неразорвавшейся авиационной бомбы, оставшейся в земле после прошедшей войны, для расположенного на расстоянии 100 м жилого пятиэтажного каменного здания. Глубина залегания бомбы 10 м, масса тротилового заряда 1000 кг, грунт – мраморизованный известняк. Период собственных колебаний здания 0,3 с.

Решение: 1. Определяем относительное заглубление заряда:

$$H_3/\sqrt[3]{G} = 10/\sqrt[3]{1000} = 1 \text{ м/кг}^{1/3}.$$

2. Находим относительное удаление здания от центра взрыва:

$$R/\sqrt[3]{G} = \sqrt{100^2 + 10^2} / \sqrt[3]{100} \approx 10 \text{ м/кг}^{1/3}.$$

3. По соотношениям (1.73), (1.74) вычисляем периоды продольной и поверхностной сейсмозрывных волн:

$$T_p = 0,0128 \cdot \sqrt[6]{1000} \approx 0,04 \text{ с},$$

$$T_R = 0,035 \cdot \sqrt[6]{1000} \cdot 10^{0,2} = 0,175 \text{ с}.$$

При $T_p < T_0$ и $T_R < T_0$, где T_0 – период собственных колебаний здания, оценка воздействия взрыва проводится по максимальной скорости колебаний грунтового основания при распределении рассматриваемых волн.

4. Скорость колебаний грунта при прохождении продольной волны вычисляем по формуле (1.69):

$$\dot{W}_{\max} = 700 \cdot \left(\frac{1000^{1/3}}{\sqrt{100^2 + 10^2}} \right)^2 \approx 7 \text{ см/с.}$$

5. Скорость колебаний грунта при прохождении поверхностной волны находим по формуле (1.72):

$$\dot{W}_{\max} = 40 \cdot \frac{1000^{2/3}}{\left(\sqrt{100^2 + 10^2} \right)^{1,52}} \approx 3,7 \text{ см/с.}$$

Таким образом, максимальная скорость колебаний грунта при прохождении сейсмозрывных волн составляет 7 см/с. При такой скорости колебания грунтового основания возможны незначительные повреждения здания.

1.12. Очаг поражения при землетрясении

Очаг поражения при землетрясении – это территория, на которой вследствие действия сейсмических волн разрушаются и повреждаются здания, сооружения, техника, гибнут и получают травмы различной степени тяжести находящиеся в зданиях и на открытой местности люди. Очаг поражения в плане, как правило, представляет собой сложную фигуру, что связано с влиянием на параметры движения грунта местных геологических условий. Следует отметить, что в целом ряде случаев форма очага поражения приближается к «эллипсообразной». Такая форма связана с тем обстоятельством, что происходящее в очаге землетрясения разрушение земных пород сопровождается разломом, длина которого может достигать десятков километров, иногда сотен километров (см. п. 1.7) Таким образом, в очаге землетрясения имеет место своего рода «плоское» движение земных пород, что приводит к перераспределению значительной части энергии землетрясения в направлении, перпендикулярном разлому. Схема очага поражения при землетрясении показана на рис. 13.

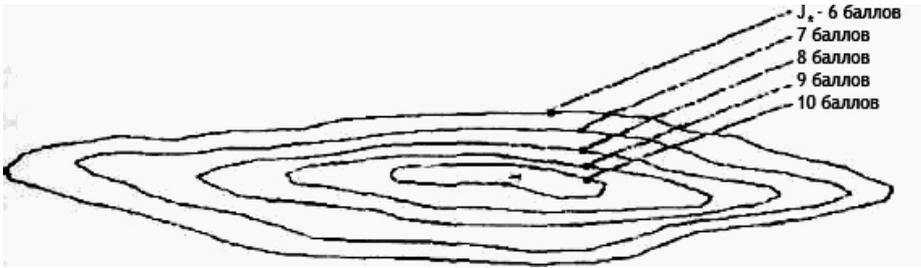


Рис.13. Очаг поражения при землетрясении

Линии, в точках которых интенсивность землетрясения одинакова, называются изосейстами.

Обычно границу очага поражения составляет изосейста $J_* = 6$ баллов. Далее следуют изосейсты $J_* = 7, 8, 9 \dots$ до J_0 , где J_0 – интенсивность землетрясения в эпицентре, баллов.

Очаг поражения рассчитывается с помощью соотношения (1.50). Заменяя в левой части этого соотношения величину J на J_* и разрешая соотношение относительно L , нетрудно получить [12]

$$L_* = H \cdot \sqrt{10^{\frac{1}{3}(J_0 + \Delta + J_*)} - 1}, \quad (1.75)$$

где L_* – расстояние от эпицентра до изосейсты J_* по заданному направлению, км, а величины J_0, H, Δ имеют то же значение, что и в формуле (1.50).

Соотношение (1.75), как и формула (1.50), справедливо при $L > H$.

В случае использования для определения очага поражения соотношения (1.51) нетрудно получить

$$L_* = H \cdot \sqrt{10^{0,571 \cdot (J_0 - J_*)} - 1}. \quad (1.76)$$

Очаг поражения вида (1.76) имеет круговую форму. Здесь под величиной L_* подразумевается радиус круга, площадь которого равновелика площади, ограниченной на местности изосейстой J_* при реальном землетрясении.

Состояние различных объектов в очаге поражения оценивается в общем случае следующими пятью степенями поражения: первая степень – повреждения; вторая, третья, четвертая, пятая – слабое, среднее, сильное и полное разрушения [1, 21].

Следует отметить, что в технической литературе встречаются несколько иные оценки: слабое, умеренное, тяжелое, разрушительное повреждения, полное разрушение. Они примерно соответствуют указанным пяти степеням поражения [15, 23].

Степени поражения зданий, сооружений различаются по объему разрушений. Для оценки степени поражения необходимо знать критерии поражения объектов (табл. 4) и их сейсмостойкость. Под сейсмостойкостью понимается способность зданий воспринимать, сохраняя свои эксплуатационные качества, инерционные нагрузки, создаваемые землетрясением.

Согласно международной шкале MMSK-86 здания и сооружения подразделяются на две группы: традиционной постройки и антисейсмической конструкции [23].

В свою очередь здания традиционной постройки подразделяются на три подгруппы: подгруппа А (здания типов A_1, A_2), подгруппа Б (здания типов B_1, B_2), подгруппа В (здания типов V_1, V_2). Подробное описание зданий этих типов приводится, например, в литературе [23].

На основании данных этой работы сейсмостойкость промышленных и жилых зданий может быть оценена следующим образом: деревянные дома – 5...6 баллов; кирпичные здания – 5,5...6 баллов; железобетонные каркасные, крупнопанельные и армированные крупноблочные здания – 6,5 баллов; монолитные здания – 7 баллов.

В табл. 4 рассматриваются три степени поражения: слабое, среднее и сильное разрушения. Очевидно, полное разрушение сооружения происходит при значении интенсивности землетрясения $J_{п,р} > J_{с,р}$, повреждения при $J_c < J_{п} < J_{л,р}$, где $J_{п,р}$, $J_{с,р}$, $J_{л,р}$ – интенсивности землетрясения, отвечающие полному, сильному, легкому разрушениям, $J_{п}$, J_c – повреждениям и сейсмостойкости здания соответственно. Согласно данным [1] переход от одной степени поражения объекта к другой происходит при увеличении (уменьшении) интенсивности землетрясения на 1 балл, то есть приблизительно $12 \text{ баллов} \geq J_{п,р} \geq J_{с,р} + 1 \text{ балл}$, $J_c < J_{п} < J_{л,р} - 1 \text{ балл}$.

Краткая характеристика степеней поражения объектов.

Первая степень поражения зданий, сооружений характеризуется наличием тонких трещин в штукатурке, в сопряжениях перекрытий со стенами, между панелями, в разделке печей и дверных коробок, в переборках, карнизах и т.п.; возможно откалывание небольших кусков штукатурки. Видимые повреждения несущих конструкций отсутствуют. Для ликвидации последствий достаточен текущий ремонт.

Вторая степень сопровождается значительными повреждениями ограждающих конструкций – откалыванием больших кусков штукатурки, сквозными трещинами в перегородках, глубокими трещинами в карнизах и фронтонах, выпадением кирпичей из труб; слабыми повреждениями несущих конструкций – наличием трещин в несущих стенах, небольшими деформациями и отколами бетона или раствора в узлах каркаса и стыках панелей. Необходим капитальный ремонт.

Третья степень характеризуется разрушением ограждающих конструкций – обрушением значительной части перегородок, карнизов, фронтонов, дымовых труб; значительными повреждениями несущих конструкций – сквозными трещинами в несущих стенах, значительными деформациями каркасов, заметными сдвигами панелей. Необходим восстановительный ремонт.

Четвертая степень сопровождается сильными разрушениями конструкций – проломами и выводами в несущих стенах, разрывами стыков и узлов каркаса, нарушениями связей между частями, обрушением панелей перекрытий, обрушением крупных частей здания. Восстановление нецелесообразно.

Пятая степень определяется разрушениями, приводящими к образованию сплошного завала.

1.13. Прогноз землетрясений. Меры защиты. Сейсмостойкое строительство

Известно, что число землетрясений, происходящих в определенный интервал времени в данном районе, снижается с увеличением их магнитуд [11]:

$$\lg(N) = K_1 - K_2 \cdot M, \quad (1.77)$$

где N – число землетрясений магнитудой M ; K_1 – коэффициент сейсмической активности района; K_2 – тектоническая константа.

Подтверждением этого соотношения могут служить данные табл. 7, в которой проводится сопоставление числа землетрясений на нашей планете в зависимости от их магнитуд [14].

Установив коэффициенты K_1 и K_2 , можно оценить возможность сильного землетрясения в конкретном регионе по наблюдениям за слабыми землетрясениями в определенный период времени. Соотношение (1.77) справедливо при $M < M_{\max}$ для данного региона.

Число землетрясений в течение года и их магнитуды

Магнитуда землетрясения, M	Число землетрясений в год, N
8	1 – 2
7 – 8	15 – 20
6 – 7	100 – 150
5 – 6	750 – 1000
4 – 5	5000 – 7000

Коэффициент сейсмической активности K_1 учитывает местные геологические условия и определяется по результатам наблюдений землетрясений в рассматриваемом районе. Для этого размеры района и интервал времени должны быть стандартизированы (например, 100 км² и 10 лет).

Тектоническая константа K_2 от времени не зависит. Имеется некоторое расхождение во мнениях: является ли она универсальной константой или изменяется от региона к региону. В нашей стране данные по величине K_2 коррелируются по результатам сейсмических наблюдений на нескольких сейсмических станциях, расположенных на территории относительно большого региона, сравнительно однородного в геологическом отношении. Примеры таких регионов – Крым, Кавказ, Прибайкалье, Камчатка и др.

Следует отметить, что в отдельных районах слабые землетрясения могут не наблюдаться. Это области или участки тектонического омоложения. В силу значительной прочности породы здесь способны накапливать большие напряжения. Такие сейсмогенные зоны характеризуются очень редкими, но сильными землетрясениями. Примеры: районы Газлийских, Чиилийского и Тамдыбулакского землетрясений в Средней Азии [24].

На основании соотношения (1.77) разработаны методики по определению максимально возможной интенсивности землетрясений в различных районах, на базе которых составлены сейсмические карты.

На территории СНГ районы возможных 9-балльных землетрясений находятся в Средней Азии, Прибайкалье, Камчатке, Курильских островах; 8-балльных – на Кавказе, в Молдавии, в Южной Сибири. Русская равнина и Урал – почти вся территория относится к 5-балльной зоне; Среднерусская возвышенность – к 4-балльной. В районе среднего течения р. Камы и среднего Урала, включая район г. Екатеринбурга, выделяется 6-балльная зона. Она продлевается по р. Мезень до

северного побережья Кольского полуострова (землетрясения 1936 и 1937 гг. интенсивностью 6...7 баллов в бассейне р. Мезень) [25].

Действующая нормативная карта утверждена в 1969 г. – СНИП П-А 12-69. На карте выделены районы 6,7,8,9-балльных землетрясений, а также районы, где возможны землетрясения более 9-ти баллов [25]. Определенное представление о размерах этих районов можно составить по данным табл. 8 [14].

Таблица 8

Зоны различной интенсивности сейсмических воздействий

Регион	Площадь (тыс. км ²) при интенсивности землетрясения в баллах			
	6	7	8	9
Алтай и Саяны	330	176	96	17
Восточная Сибирь	738	820	187	182
Якутия и район Магадана	903	233	124	
Чукотка	114	26		
Камчатка и Командорские острова	148	63	53	41
Курильские острова				16
Сахалин	30	46		
Приморье	155	9		
Крым	11	3	1	

Несомненно, что важно спрогнозировать время возникновения, положение эпицентра и интенсивность землетрясения. Если землетрясение нельзя предотвратить, то, по крайней мере, необходимо вовремя предупредить население, чтобы люди покинули дома и вышли на открытое место (на удаление, равное или большее высоте здания, и вдали от линий электропередач), и тем самым снизить до минимума число возможных жертв.

Долгие годы в решении этой сложной задачи заметных успехов не было. Однако в последнее время разработаны методы, позволившие спрогнозировать ряд землетрясений. В качестве примера можно указать прогноз Хайченского землетрясения в Китае 4.02.1975 г. Оповещение о предстоящем сильном землетрясении было сделано за 9 часов до того, как оно началось. Разразившееся землетрясение оказалось очень сильным – было разрушено 50% зданий в районе с населением более миллиона человек. Однако благодаря своевременно принятым мерам число жертв было сравнительно небольшим - погибло ~300 человек. Тем не менее, было бы неправильным считать, что задача предсказаний землетрясений полностью решена. Прошло всего полтора года после

упомянутого землетрясения и в Китае разразилось катастрофическое по числу жертв Таншаньское землетрясение 1976 года, когда погибло 243 тысячи человек [2].

На чем основывается возможность предсказания землетрясений?

Во-первых, следует отметить способ, который заключается в экстраполяции на будущее данных наблюдений за землетрясениями в прошлом. Способ лежит в основе долгосрочного прогноза. Обобщаются сведения о землетрясениях за несколько десятков и сотен лет, оценивается сейсмический риск. Сейсмический риск – это опасность повреждений сооружений от землетрясений в данном регионе. Он определяется как вероятность реализации не менее одного землетрясения, наносящего ущерб различным объектам, см. п. 2.7. Места возможных землетрясений оцениваются по сейсмическим картам.

Эффективным средством краткосрочного прогноза является комплексная оценка предвестников землетрясения, к которым относятся: предварительные толчки – форшток, изменения параметров геофизических полей, деформации земной поверхности в эпицентральной области, изменения состава подземных вод, изменения в поведении животных.

Не останавливаясь подробно на всех предвестниках, следует отметить, что перед началом землетрясения подземные породы находятся в сильно напряженном состоянии. Возникновение значительных механических напряжений заметно изменяет свойства пород, они становятся аномальными, то есть необычными. Наблюдаются аномалии разного рода – электрические, магнитные, упругие и т.д. Аномальные отклонения геофизических полей обнаруживают с помощью соответствующих приборов, установленных на сейсмических станциях. Высокоэффективными оказываются наблюдения за геофизическими аномалиями с помощью приборов, установленных на искусственных спутниках Земли.

Наращение механических напряжений приводит также к увеличению концентраций в подземных водах радона, гелия, неона, аргона, криптона. Растут их концентрации и в газовых потоках, которые давление в недрах Земли «выжимает» к земной поверхности. Проводя химический анализ воды или газа в существующих и пробуренных скважинах, можно выявить назревающее землетрясение.

К необычному поведению животных перед землетрясением следует отнести беспокойство рыб в аквариумах, мелких домашних животных, птиц, пресмыкающихся в горах. Так успешное предсказание Хайченского

землетрясения в 1975 году в немалой степени основывалось на сообщениях о необычном поведении домашних животных [2].

На территории нашей страны развернута сеть постоянно действующих сейсмических станций, входящих в единую систему сейсмических наблюдений (ЕССН). Данные наблюдений об угрозе землетрясений докладываются в центр срочных донесений в г. Обнинске. После обработки заключение выдается в систему оповещения Гражданской обороны и другим заинтересованным организациям.

Важным средством обеспечения безопасности населения в сейсмоопасных районах является сейсмостойкое строительство. Оно ведется согласно СНиП 11-7-81. Опасными для зданий считаются землетрясения, интенсивность которых достигает $J = 7$ баллов и более. В районах, где прогнозируемая величина J не превышает 6 баллов, проведение антисейсмических мероприятий обычно не предусматривается. Строительство в районах, где прогнозируемая величина интенсивности землетрясения $J > 9$ баллов, весьма неэкономично. Поэтому в нормах указания ограничены районами $7 \div 9$ балльной сейсмичности.

Для большинства зданий и сооружений интенсивность воздействия землетрясений – расчетная сейсмичность принимается равной сейсмичности строительной площадки. Для особо ответственных сооружений расчетная сейсмичность повышается по сравнению с сейсмичностью строительной площадки (как правило, на 1 балл, что соответствует увеличению сейсмической нагрузки вдвое), а для временных сооружений (например, небольших складов), разрушение которых не связано с человеческими жертвами, снижается.

Степень воздействия сейсмических волн на здания и сооружения зависит от геологических условий, см. соотношение (1.50). Наиболее благоприятными в сейсмическом отношении считаются скальные грунты. Сильно выветренные или нарушенные геологическими процессами породы, просадочные грунты, районы осыпей, плавунцов, горных выработок не благоприятны, а иногда и не пригодны для строительства. В тех случаях, когда строительство все же осуществляется, прибегают к усилению оснований, что значительно удорожает строительные работы.

Сейсмостойкость зданий, сооружений обеспечивается как выбором благоприятной в сейсмическом отношении строительной площадки, так и разработкой конструктивных мероприятий, создающих возможность развития в ответственных элементах и узлах пластических деформаций,

значительно увеличивающих сопротивляемость зданий, сооружений действию сейсмических сил. Большое значение имеет также высокое качество строительных материалов и работ [26].

Учитывая приближенный характер методов расчетной оценки сейсмостойкости сооружений, вводятся ограничения горизонтальных размеров зданий и их высоты, что обусловлено необходимостью исключения совпадения значений периодов собственных колебаний здания и колебаний грунтового основания при прохождении сейсмических волн. Для кирпичных стен определены минимальные размеры сечений простенков и расстояния между стенами. Требуется обязательное введение поэтажных железобетонных поясов и т.д. Высота зданий с кирпичными стенами, возводимых в районах с 7-балльной сейсмичностью, не должна превышать 4-х этажей, а в 9-балльной – 2-х этажей. Более полные сведения о сейсмостойком строительстве приведены в СНиП 11-7-81.

Глава 2. ОЦЕНКА ОБСТАНОВКИ В ОЧАГЕ ПОРАЖЕНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

2.1. Некоторые сведения из теории вероятностей. Понятие случайной величины

При оценке последствий воздействия землетрясения на различные объекты неизбежно возникает задача определения вероятности поражения объекта, а также оценки ущерба и потерь. Случайной величиной является либо значение параметра воздействующего поражающего фактора при землетрясении, либо результат самого воздействия.

Отнесение значения параметра воздействующего фактора к категории случайных величин оправдано тем, что интенсивность землетрясения зависит от ряда непредсказуемых причин, например, энергии землетрясения, глубины очага, физико-механических свойств грунта, по которому распространяются сейсмические волны.

Столь же справедливым является предположение о случайном характере воздействия конкретного поражающего фактора на объект. Причинами, определяющими случайность воздействия, являются, например, неточности в оценке прочностных характеристик сооружения, погрешности в оценке эпицентрального расстояния до объекта.

Случайной величиной называется величина, которая в результате опыта может принимать то или иное значение (заранее не известно, какое именно). Она может быть непрерывной или дискретной.

Основное представление о случайной величине дает закон ее распределения – соотношение между значениями случайной величины и вероятностями их реализации [8].

Функцией распределения случайной величины X называется функция $F(x)$, выражающая вероятность того, что случайная величина X примет значение меньше, чем некоторое заданное значение x :

$$F(x) = P|_{X < x}, \quad (2.1)$$

где P – вероятность.

Значение $F(x)$ находится по формуле

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(\xi) d\xi. \quad (2.2)$$

Функция $F(x)$ есть неубывающая функция:

$$F(-\infty) = 0, F(+\infty) = 1.$$

Плотностью распределения случайной величины называется функция

$$f(x) = F'(x). \quad (2.3)$$

Плотность распределения любой случайной величины неотрицательна $f(x) > 0$. Основным свойством плотности распределения является равенство единице ее интеграла в пределах возможного интервала изменения значений случайной величины:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1. \quad (2.4)$$

График плотности $f(x)$ называется кривой (законом) распределения.

Элементом вероятности для случайной величины X называется величина $f(x)dx$, приближенно выражающая вероятность попадания случайной точки X в элементарный отрезок dx , примыкающий в этой точке. График плотности распределения демонстрирует изменение вероятности появления каждого конкретного значения случайной величины (рис. 14).

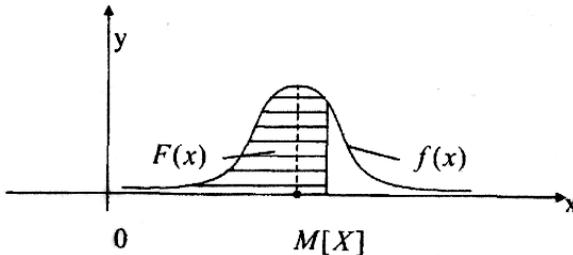


Рис. 14. Закон распределения случайной величины

На этом рисунке заштрихованная область соответствует вероятности того, что случайная величина X примет значение меньше заданного значения x (определяется по формуле (2.2)); $M[X]$ — математическое ожидание величины X .

Математическим ожиданием случайной величины X называется ее среднее значение, вычисляемое по соотношениям

$$M[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx \quad \text{— для непрерывных случайных величин,}$$

$$M[x] = \sum_i x_i p_i \quad \text{— для дискретных случайных величин.}$$
(2.5)

Дисперсией непрерывной случайной величины называется величина, характеризующая разброс значений случайной величины относительно ее математического ожидания:

$$D[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M[X])^2 f(x)dx.$$
(2.6)

Дисперсией дискретной случайной величины называется математическое ожидание квадрата соответствующей центрированной случайной величины:

$$D[X] = \sum_i (x_i - M[X])^2 \cdot p_i.$$
(2.7)

В соотношениях (2.5), (2.7) значения p_i — это вероятности величин x_i . Вероятность попадания случайной величины X на участок, протяженностью от α до β , находится по соотношению

$$P(\alpha \leq X \leq \beta) = F(\beta) - F(\alpha) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx.$$
(2.8)

Средним квадратическим отклонением σ случайной величины X называется корень квадратный из дисперсии:

$$\sigma[X] = \sqrt{D[X]}.$$
(2.9)

2.2. Нормальный закон распределения случайной величины. Распределение Пуассона

Во многих случаях распределение случайной величины подчиняется нормальному закону распределения.

Непрерывная случайная величина X называется распределенной по нормальному закону, если плотность ее распределения подчинена зависимости [8]

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x - M[X])^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (2.10)$$

Используя подстановку $t = \frac{x - M[X]}{\sigma}$, вероятность попадания случайной величины X , распределенной по нормальному закону, в интервал (α, β) можно представить в виде

$$\begin{aligned} P(\alpha \leq X \leq \beta) &= \Phi(y_1) - \Phi(y_2) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_{-\infty}^{y_1} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt - \int_{-\infty}^{y_2} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \right], \end{aligned} \quad (2.11)$$

где $y_1 = \frac{\beta - M[X]}{\sigma}$, $y_2 = \frac{\alpha - M[X]}{\sigma}$.

Интеграл вида

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (2.12)$$

часто встречается в задачах теории вероятностей. Его значение – табулированная функция Лапласа [8]. На практике удобнее пользоваться аппроксимационными зависимостями [28, 29].

Для оценки вероятности поражения объекта профессором Яковлевым В.В. рекомендовано использовать аппроксимацию, предложенную Евстифеевым Ф.А. [28, 29]:

$$P|_{x < x} = 0,5 + \Phi(z), \quad (2.13)$$

где функция $\Phi(x)$ определена только для положительных значений z ,

$$\Phi(z) = 0,5 \left[1 - \exp(-0,37z^2 - 0,8z) \right] \quad (2.14)$$

Поскольку функция Лапласа обладает свойством симметрии, принимается

$$\Phi(-z) = \Phi(z). \quad (2.15)$$

Вероятность поражения объекта

$$P|_{X < x} = 0,5 \pm \Phi(z). \quad (2.16)$$

Для удобства пользования последнее соотношение можно представить в виде

$$\begin{aligned} P|_{X < x} &= 0,5 + \Phi(|z|) \text{ при } z > 0, \\ P|_{X < x} &= 0,5 - \Phi(|z|) \text{ при } z < 0, \\ \Phi(z) &= 0,5 \left[1 - \exp(-0,37|z|^2 - 0,8|z|) \right]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

В формулах (2.17) нормированное отклонение z находится по соотношению

$$z = \frac{x - M[X]}{\sigma}. \quad (2.18)$$

Учитывая особенности нормального закона распределения, для которого вероятность реализации случайной величины, значения которой не превосходят $M[X] - 3\sigma$, составляет 0,0014, а вероятность реализации случайной величины, значения которой не превосходят $M[X] + 3\sigma$, составляет 0,9984, можно сказать, что в случае, если значение случайной величины укладываются в интервал $(M[X] - 3\sigma, M[X] + 3\sigma)$, то вероятность ее реализации практически равна единице.

С учетом этого допущения, значения нормированного отклонения z , математического ожидания M и среднеквадратического отклонения σ при определении вероятности поражения объекта при землетрясении находятся по соотношениям

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2}, \\
 \sigma &= \frac{I_{\max} - I_{\min}}{6}, \\
 z &= \frac{I - M}{\sigma},
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

где I_{\max} – максимальное значение параметра, определяющее нижнюю границу значений безусловного поражения объекта; I_{\min} – минимальное значение параметра, определяющее верхнюю границу значений безопасности объекта; I – воздействующее значение параметра (интенсивность землетрясения), для которого рассчитывается вероятность поражения объекта.

Распределением Пуассона обычно описывается распределение дискретной случайной величины.

Случайная величина называется распределенной по закону Пуассона, если она принимает счетное множество возможных значений $0, 1, 2, 3, \dots, N$ с вероятностями [8]

$$P(N) = \frac{\lambda^N}{N!} e^{-\lambda}, N = 1, 2, 3, \dots, \lambda, \tag{2.20}$$

где λ – параметр распределения; N – число рассматриваемых событий.

Примеры пользования соотношениями (2.17), (2.20) приводятся в следующем параграфе.

2.3. Построение параметрического и координатного законов поражения

Параметрическим законом поражения называется зависимость вероятности поражения объекта от заданных значений характеристик поражающего фактора (в рассматриваемом случае – интенсивности землетрясения).

Алгоритм построения параметрического закона поражения [28]:

- определить значения поражающего фактора, характеризующие нижнюю границу значений безусловного поражения и верхнюю границу значений безопасности объекта;

- задаться количеством рассматриваемых точек в определенном выше интервале значений поражающего фактора и соответствующими значениями воздействующего фактора в каждой из этих точек;
- по формулам (2.19) вычислить для каждого заданного значения воздействующего фактора соответствующие константы нормального закона распределения;
- по формуле (2.17) найти вероятности поражения объекта, соответствующие каждому значению поражающего фактора;
- построить график изменения вероятности поражения объекта при различных значениях воздействующего фактора.

Пример. Определить вероятность поражения промышленного здания при воздействии землетрясения интенсивностью $I = 7,5$ балла, если величина I_{\max} , определяющая нижнюю границу значений безусловного поражения данного здания, составляет 9 баллов, безопасное значение $I_{\min} = 6$ баллов.

Решение: 1. По формулам (2.19) вычисляем значения параметров нормального закона распределения:

$$M = \frac{9 + 6}{2} = 7,5 \text{ баллов,}$$

$$\sigma = \frac{9 - 6}{6} = 0,5 \text{ балла,}$$

$$z = \frac{7,5 - 7,5}{0,5} = 0.$$

2. По третьему соотношению (2.19) вычисляем значение функции $\Phi(|z|)$:

$$\Phi(|z|) = 0,5 \left[1 - \exp(-0,37|0|^2 - 0,8|0|) \right] = 0.$$

3. Вероятность поражения здания находим по первому соотношению (2.19):

$$P = 0,5 + 0 = 0,5.$$

Пример. При условиях предыдущего примера построить параметрический закон поражения.

Решение: 1. В пределах диапазона значений интенсивности землетрясения от $I_{\min} = 6$ баллов до $I_{\max} = 9$ баллов зададимся несколькими значениями I с шагом, например, 0,5 балла. Для каждого

значения I находим вероятность поражения здания (по аналогии с предыдущим примером). Результаты расчетов сведены в табл. 9.

Таблица 9

Характеристики параметрического закона поражения

Интенсивность землетрясения, балл	Нормированное отклонение, z	Вероятность поражения
6,0	-3	0,002
6,5	-2	0,033
7,0	-1	0,155
7,5	0	0,500
8,0	1	0,845
8,5	2	0,977
9,0	3	0,998

2. Строим график параметрического закона поражения (рис. 15).

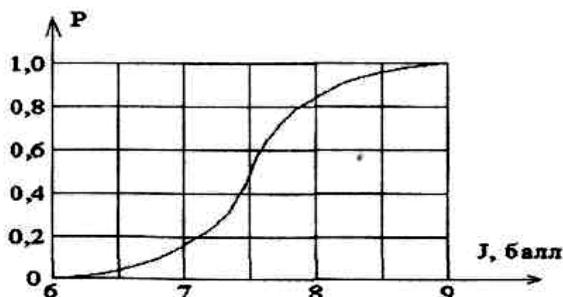


Рис. 15. Параметрический закон поражения

Координатным законом поражения называется зависимость вероятности поражения объекта от координат источника воздействия и объекта поражения. Случайной величиной, как правило, является расстояние между ними.

В большинстве случаев с увеличением расстояния вероятность поражения объекта уменьшается. Таким образом, в отличие от параметрического закона поражения максимальному значению аргумента (максимальному расстоянию) будет соответствовать граница безопасности, а минимальному — граница безусловного поражения.

Алгоритм построения координатного закона поражения практически соответствует алгоритму построения параметрического закона, за исключением формулы вычисления вероятности поражения, которая в данном случае принимает вид [28]

$$\begin{aligned}
 P|_{R < r} &= 0,5 - \Phi(|z|) \text{ при } z > 0, \\
 P|_{R < r} &= 0,5 + \Phi(|z|) \text{ при } z < 0, \\
 M &= \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2}, \sigma = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{6}, z = \frac{r - M[R]}{\sigma},
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

где R – случайная величина расстояния между источником воздействия и объектом поражения (при землетрясении под величиной R подразумевается расстояние L , рис. б); r – заданное значение расстояния.

Пример. Построить координатный закон поражения кирпичных многоэтажных зданий при землетрясении, если безопасное расстояние для данного типа зданий составляет 120 км, а на расстоянии 30 км (и меньших расстояниях) имело место полное разрушение зданий.

Решение: 1. По формулам (2.21) вычисляем значения констант нормального закона распределения M и σ :

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{120 + 30}{2} = 75 \text{ км}, \\
 \sigma &= \frac{120 - 30}{6} = 15 \text{ км}.
 \end{aligned}$$

2. В пределах диапазона значений расстояний от 30 км до 120 км зададимся несколькими значениями r , например, с шагом 10 км. Для каждого r находим значение параметра z и величину P . Результаты расчетов сведены в табл. 10.

Таблица 10

Характеристики координатного закона поражения

Расстояние, км	Нормированное отклонение, z	Вероятность поражения
30	-3,00	0,998
40	-2,33	0,990
50	-1,67	0,953
60	-1,00	0,845
70	-0,33	0,633
80	0,33	0,368
90	1,00	0,155
100	1,67	0,047
110	2,33	0,010
120	3,00	0,002

4. Строим график координатного закона поражения (рис. 16).

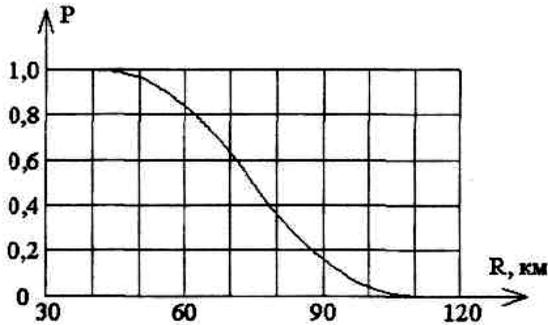


Рис. 16. Координатный закон поражения

Самостоятельный интерес представляет оценка вероятности дискретной случайной величины.

При изучении опасных природных процессов часто бывает необходимым оценить вероятность какого-либо события в течение определенного временного интервала. Вероятность $P(N, T)$ появления N рассматриваемых событий за период времени T определяется в зависимости от среднего числа μ таких событий в единицу времени по формуле (2.20), которая может быть представлена в виде

$$P(N, T) = \frac{(\mu T)^N}{N!} \exp(-\mu T), \quad N = 1, 2, 3, \dots, \mu T. \quad (2.22)$$

В этой формуле параметр распределения Пуассона записан в виде

$$\lambda = \mu T.$$

Опираясь на соотношение (2.22), нетрудно определить вероятность того, что произойдет ровно одно событие:

$$P(1, T) = \mu T \exp(-\mu T). \quad (2.23)$$

Вероятность того, что не произойдет ни одного события,

$$P(0, T) = \exp(-\mu T), \quad (2.24)$$

а вероятность того, что произойдет хотя бы одно (не менее одного) события

$$P(T) = 1 - P(0, T) = 1 - \exp(-\mu T). \quad (2.25)$$

2.4. Оценка состояния зданий, сооружений на объекте после землетрясения

Для оценки состояния зданий, сооружений после землетрясения могут быть использованы данные табл.4. Кроме того, в приближенных расчетах можно пользоваться рекомендациями [1], приведёнными в п. 1.12. Согласно им переход от одной степени поражения к другой происходит при увеличении (уменьшении) интенсивности землетрясения на 1 балл:

$$\left. \begin{array}{l} I_j = I_{j-1} + 1 \text{ балл} \\ I_j = I_{j+1} - 1 \text{ балл} \end{array} \right\}, j = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (2.26)$$

где I_j, I_{j-1}, I_{j+1} – интенсивности землетрясений, приводящих к j -й, $j-1$, $j+1$ степеням поражения объекта соответственно.

Значение I_1 отвечает первой степени поражения сооружения, то есть повреждению; I_2, I_3, I_4, I_5 – второй, третьей, четвертой и пятой степеням поражения, то есть слабому, среднему, сильному и полному разрушениям соответственно.

В целом ряде случаев при оценке состояния зданий, сооружений необходимо также знать ущерб, нанесенный этим сооружениям. Для оценки ущерба в приближенных расчетах используется данные табл.11 [14].

Таблица 11

Величина ущерба в зависимости от степени разрушения здания (оценочные данные)

Степень разрушения здания	Ущерб, %
Полное разрушение	90 ÷ 100
Сильное разрушение	50 ÷ 70
Среднее разрушение	30 ÷ 40
Слабое разрушение	10 ÷ 15

Обращает внимание неполнота данных этой таблицы (отсутствуют данные по ущербу при повреждениях). Кроме того, имеют место разрывы в значениях ущерба при переходе от одной степени разрушения здания к другой.

Более строгие оценки могут быть получены при сопоставлении величины ущерба с вероятностью поражения сооружения. Вероятность поражения в данном случае является математическим ожиданием ущерба.

Пример расчета вероятности поражения промышленного здания рассмотрен в предыдущем параграфе.

Очевидно, на территории объекта могут находиться различные здания, сооружения (рис. 17).

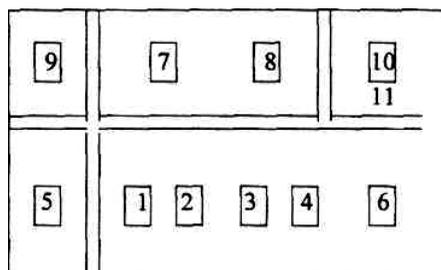


Рис.17. План-схема объекта

На рис. 17 обозначено:

№№ 1,2,3,4 – производственные цеха (здания с легким металлическим каркасом);

№ 5 – котельная (здание с тяжелым металлическим каркасом);

№ 6 – заводоуправление (кирпичное многоэтажное здание);

№№ 7,8,9,10 – механическая мастерская, оздоровительный комплекс, склад сырья, склад готовой продукции соответственно (кирпичные малоэтажные здания);

№ 11 – заводская дорога с асфальтовым покрытием.

При известных значениях критериев безусловного поражения и сейсмостойкости зданий расчет вероятности их поражения практически не отличается от выполненного примера.

Пусть, например, величина интенсивности землетрясения, определяющая нижнюю границу значений безусловного поражения зданий №№ 1,2,3,4 составляет 9,5 балла, здания № 5 – 10,5 балла, зданий №№ 6,7,8,9,10 – 8,5 балла. Такие данные можно получить, если,

например, принять для зданий №№ 1,2,3,4 величину $I_{с.р} = 8,5$ балла, здания № 5 – 9,5 балла, зданий №№ 6,7,8,9,10 – 7,5 балла, где $I_{с.р}$ – интенсивность землетрясения, при которой происходит сильное разрушение (см. табл. 4). Тогда согласно соотношениям (2.26) $I_{п.р} > I_{с.р} + 1$ балл, где $I_{п.р}$ – интенсивность землетрясения, при которой происходит полное разрушение и обеспечивается безусловное поражение сооружения.

Значения сейсмостойкости зданий нескольких типов приведены в п. 1.12. Применительно к рассматриваемому объекту они могут составлять (допустимо принять): для зданий №№ 1,2,3,4 – 6 баллов, здания № 5 – 6,5 балла, зданий №№ 6,7,8,9,10 – 6 баллов.

В табл. 12 штриховкой показана степень разрушения соответствующих зданий.

Так как в табл. 11 имеют место разрывы в значениях ущерба при переходе от одной степени поражения объекта к другой и, кроме того, отсутствуют данные по ущербу при повреждениях, здесь принято, что при вероятности поражения $P = 0,07$ здания № 5 его степень поражения близка к слабому разрушению; при вероятности поражения $P = 0,73$ зданий №№ 6,7,8,9,10 – к сильному разрушению.

Следует отметить, что данные табл. 12 по степеням разрушения зданий соответствуют данным табл. 4, в которой приведены критерии поражения различных объектов. Действительно, согласно данным табл. 4, при интенсивности землетрясения $I = 7,5$ балла степень поражения рассматриваемых в примере зданий №№ 1,2,3,4 можно оценить как среднее, здания № 5 – как слабое, зданий №№ 6,7,8,9,10 – как сильное разрушение.

Отмеченное обстоятельство подтверждает достоверность приведенных в табл. 12 результатов.

Таблица 12

Состояние зданий на объекте после землетрясения

Здание №	Степени разрушения				Мат. ожид. ущерба
	полное	сильное	среднее	слабое	
1			+		0,33
2			+		0,33
2			+		0,33
4			+		0,33
5				+	0,07
6		+			0,73
7		+			0,73
8		+			0,73
9		+			0,73

10		+			0,73
----	--	---	--	--	------

Самостоятельное значение при оценке последствий землетрясения имеет определение человеческих потерь. Такие потери связаны в основном с разрушением зданий и сооружений. Для оценки потерь в приближенных расчетах используются данные табл. 13 [21].

Таблица 13

Потери людей при разрушении зданий (ориентировочные данные)

Степень разрушения здания	Потери людей, %		
	Общие	Безвозвратные	Санитарные
Полное	90	80	10
Сильное	50	15	35
Среднее	40	10	30
Слабое	15	-	15

Зная число людей в каждом здании до землетрясения, по данным табл. 12 и 13 можно оценить санитарные и возвратные потери.

Пусть, например, в зданиях №№ 1,2,3,4 работает по 100 человек, в здании № 5 – 15 человек, в здании № 6 – 150 человек, в № 7 – 50 человек, в здании № 8 – 25 человек, в зданиях №№ 9,10 по 10 человек. Необходимо оценить потери людей при рассматриваемом землетрясении.

Результаты расчета сведены в табл. 14.

Таблица 14

Потери людей на объекте при землетрясении

Здание, №	Численность рабочих и служащих	Потери людей, человек		
		общие	безвозвратные	санитарные
1	100	40	10	30
2	100	40	10	30
3	100	40	10	30
4	100	40	10	30
5	15	2	-	2
6	150	75	23	52
7	50	25	8	17
8	25	13	4	9
9	10	5	2	3
10	10	5	2	3
Итого:	660	285	79	206

2.5. Оценка ущерба

Величина ущерба в стоимостном выражении приближенно может быть оценена по методике, предложенной Васильевым В.И. [30].

Ущерб, нанесенный предприятию в результате ЧС (природного стихийного бедствия, техногенной катастрофы), подразделяется на прямой и косвенный ущербы:

$$Y = Y_{\text{п}} + Y_{\text{к}}, \quad (2.27)$$

где Y – полный ущерб; $Y_{\text{п}}$ – прямой ущерб; $Y_{\text{к}}$ – косвенный ущерб.

Величина прямого ущерба находится по соотношению

$$Y_{\text{п}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{зи}}^* M_{\text{зи}} + \sum_{i=1}^l C_{\text{тои}}^* M_{\text{тои}} + \sum_{i=1}^m C_{\text{эси}}^* M_{\text{эси}} + \sum_{i=1}^n C_{\text{оби}}^* M_{\text{оби}}. \quad (2.28)$$

Здесь $C_{\text{зи}}^* = C_{\text{зи}} \left(1 - \frac{H_{\text{зи}} \cdot T_{\text{зи}}}{100} \right)$ – остаточная стоимость i -го здания на момент ЧС, руб;

$C_{\text{тои}}^* = C_{\text{тои}} \left(1 - \frac{H_{\text{тои}} \cdot T_{\text{тои}}}{100} \right)$ – остаточная стоимость i -го оборудования на момент ЧС, руб;

$C_{\text{эси}}^* = C_{\text{эси}} \left(1 - \frac{H_{\text{эси}} \cdot T_{\text{эси}}}{100} \right)$ – остаточная стоимость i -ой энергетической сети на момент ЧС, руб.;

$C_{\text{зи}}$, $C_{\text{тои}}$, $C_{\text{эси}}$, $C_{\text{оби}}$ – балансовая стоимость i -ых здания, оборудования, энергетической сети и стоимость оборотных средств соответственно, руб.;

$M_{\text{зи}}$, $M_{\text{тои}}$, $M_{\text{эси}}$, $M_{\text{оби}}$ – математическое ожидание относительной величины ущерба, нанесенного i -ым зданию, оборудованию, энергетической сети, оборотным средствам;

$H_{\text{зи}}$, $H_{\text{тои}}$, $H_{\text{эси}}$ – нормы амортизации здания, оборудования, энергетической сети, %/год;

$T_{\text{зи}}$, $T_{\text{тои}}$, $T_{\text{эси}}$ – срок службы до ЧС i -ых здания, оборудования, энергетической сети, в годах;

k , l , m , n – количество пострадавших зданий, оборудования, энергетических сетей, оборотных средств соответственно;

ЧС – чрезвычайная ситуация.

Косвенный ущерб оценивается по соотношению

$$Y_k = C_v + C_{\Pi} + C_{\text{ш}} + C_{\text{аср}} + C_{\text{лп}} + C_{\text{оп}}. \quad (2.29)$$

Здесь:

$$\text{а) } C_v = \left(\sum_{i=1}^k C_{zi} M_{zi} + \sum_{i=1}^l C_{\text{то}i} M_{\text{то}i} + \sum_{i=1}^m C_{\text{э}ci} M_{\text{э}ci} \right) \frac{\Pi' T}{100} - \text{ стоимость}$$

восстановления предприятия, руб.;

Π' – норма банковского кредита, %/год;

T – время восстановления предприятия, в годах,

$$T = \frac{R}{R_0 - R_*},$$

$$\text{где } R = \frac{\sum_{i=1}^k C_{zi} M_{zi}}{P_z} + \frac{\sum_{i=1}^l C_{\text{то}i} M_{\text{то}i}}{P_{\text{то}}} + \frac{\sum_{i=1}^m C_{\text{э}ci} M_{\text{э}ci}}{P_{\text{э}c}} - \text{ число рабочих,}$$

потребное для восстановления предприятия в течение 1 года; R_0 – число рабочих на предприятии до ЧС, чел.; R_* – потери производственного персонала при ЧС (погибшие и часть рабочих, получивших тяжелые травмы и не способных принять участие в восстановительных работах в период восстановления предприятия [30]), чел.

$$\text{б) } C_{\Pi} = \frac{\Pi''}{100} N_c C_{\text{тп}} t - \text{ утраченная величина прибыли за время}$$

восстановления предприятия, руб.;

Π'' – относительная величина прибыли от реализации единицы товарной продукции, %;

N_c – суточный выпуск товарной продукции, штук;

$C_{\text{тп}}$ – цена единицы товарной продукции, руб.;

$t = 250T$ – время восстановления предприятия, в рабочих днях.

$$\text{в) } C_{\text{ш}} = \frac{\Pi''' }{100} N_c C_{\text{тп}} t - \text{ величина штрафов за невыполнение}$$

договорных обязательств по поставке готовой продукции потребителю, руб.;

Π''' – норматив штрафов за недопоставку единицы товарной продукции, %/день.

г) $C_{\text{аср}} \approx (0,005...0,01)U_{\text{п}}$ – средства, необходимые для проведения аварийно-спасательных работ.

К ним относятся:

- разведка очага поражения;
- поиск пострадавших;
- расчистка проездов в завалах;
- извлечение пострадавших из завалов;
- эвакуация пострадавших из очага поражения;
- тушение пожаров и отключение участков поврежденных энергетических сетей.

д) $C_{\text{лп}} \approx (0,04...0,08)U_{\text{п}}$ – средства, необходимые для ликвидации последствий ЧС.

К ним относятся:

- разборка зданий, получивших полное и сильное разрушение;
- демонтаж уцелевшего и поврежденного технологического оборудования;
- разборка и уборка завалов.

е) $C_{\text{оп}} = \sum_{i=1} N_i D_i$ -сумма расходов для оказания помощи семьям

погибших, а также пострадавшим при ЧС;

N_i – количество пострадавших, получивших i -ю степень поражения;

D_i – величина денежной компенсации при i -й степени поражения.

При проведении расчетов по формулам (2.28), (2.29) значительная часть исходных данных обычно известна. Как правило, это значение балансовой стоимости C_{zi} , C_{toi} , $C_{эci}$, $C_{оби}$ норм амортизации H_{zi} , H_{toi} , $H_{эci}$ времен T_{zi} , T_{toi} , $T_{эci}$ нормы банковского кредита Π' , величин Π'' , Π''' . Часть данных, например, значения математического ожидания M_{zi} и число безвозвратных и санитарных потерь, могут быть определены согласно рекомендациям предыдущего параграфа. Значения M_{toi} , $M_{эci}$ могут быть сопоставлены определенным образом с величиной M_{zi} (при известных критериях поражения оборудования и энергетических сетей значения M_{toi} , $M_{эci}$ рассчитываются более строго). Величину денежной компенсации D_i семьям погибших и пострадавшим целесообразно принимать согласно рекомендациям [30].

Необходимо отметить, что в более строгих расчетах при определении величины $Y_{\text{к}}$ учитываются некоторые дополнительные потери, например, расходы на возмещение ущерба окружающей среде и др.

Важное значение имеет страхование предприятия на случай ЧС. Величина выплат страховой компанией при наступлении страхового случая, позволяющих поддержать предприятие в условиях ЧС, может быть определена согласно рекомендациям [30].

Пример. Оценить прямой ущерб предприятию от землетрясения интенсивностью $I = 7,5$ балла применительно к условиям примера предыдущего параграфа. План-схема предприятия показана на рис. 17. Краткое описание зданий, сооружений, даны в пояснениях к рисунку. Состояния зданий на предприятии после землетрясения определяется данными табл. 12. Балансовые стоимости зданий, технологического оборудования, энергетических сетей, стоимость оборотных средств приведены в табл. 15. Нормы амортизации зданий, оборудования, энергетических сетей составляет $H_{zi} = 2\%/год$, $H_{toi} = 5\%/год$, $H_{эci} = 5\%/год$. Время работы предприятия до землетрясения $T = 10$ лет. При проведении расчетов в примере допускается принять $M_{zi} = M_{toi} = M_{эci} = M_{оби}$, где M_{zi} , M_{toi} , $M_{эci}$, $M_{оби}$ – математическое ожидание ущерба i -ым зданию, технологическому оборудованию, энергетической сети, оборотным средствам; значения M_{zi} приведены в табл. 12.

Таблица 15

Балансовая стоимость зданий, технологического оборудования, энергетических сетей, стоимость оборотных средств

Здание, №	Стоимость, млн. руб.			
	C_{zi}	C_{toi}	$C_{эci}$	$C_{оби}$
1	3,5	3,5	1,5	0,05
2	4,0	4,0	1,5	0,10
3	4,5	5,0	2,0	0,15
4	5,0	6,0	2,0	0,20
5	6,0	6,0	2,5	0,10
6	6,0	6,0	2,0	0,05
7	3,0	4,0	1,5	0,05
8	4,0	3,0	1,5	0,01
9	2,0	2,0	1,0	0,10
10	2,0	2,0	1,0	0,50

П р и м е ч а н и е. Номера зданий этой таблицы соответствуют обозначениям табл. 12.

Решение: 1. Определяем остаточную стоимость 1-го здания, технологического оборудования, энергетических сетей и стоимость оборотных средств в этом здании на момент землетрясения, опираясь на пояснения к формуле (2.28):

$$C_{з1}^* = 3,5 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 10}{100}\right) = 2,8 \text{ млн. руб.}$$

$$C_{то1}^* = 3,5 \cdot \left(1 - \frac{5 \cdot 10}{100}\right) = 1,75 \text{ млн. руб.}$$

$$C_{эс1}^* = 1,5 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 10}{100}\right) = 0,75 \text{ млн. руб.}$$

$$C_{об1} = 0,05 \text{ млн. руб.}$$

Результаты расчета $C_{зи}^*$, $C_{тоi}^*$, $C_{эси}^*$, $C_{оби}$, где $i = 1, 2, \dots, 10$, приведены в табл. 16.

Таблица 16

Стоимость зданий, технологического оборудования, энергетических сетей, стоимость оборотных средств на момент землетрясения

Здание, №	Стоимость, млн. руб.			
	$C_{зи}^*$	$C_{тоi}^*$	$C_{эси}^*$	$C_{оби}$
1	2,8	1,75	0,75	0,05
2	3,2	2,0	0,75	0,10
3	3,6	2,5	1,0	0,15
4	4,0	3,0	1,0	0,20
5	4,8	3,0	1,25	0,10
6	4,8	3,0	1,0	0,05
7	2,4	2,0	0,75	0,05
8	3,2	1,5	0,75	0,01
9	1,6	1,0	0,5	0,10
10	1,6	1,0	0,5	0,50

2. По формуле (2.28) определяем прямой ущерб, используя данные табл. 16 и табл. 12:

$$\begin{aligned}
Y = & (2,8 \cdot 0,33 + 3,2 \cdot 0,33 + 3,6 \cdot 0,33 + 4 \cdot 0,33 + 4,8 \cdot 0,07 + 4,8 \cdot 0,73 + \\
& + 2,4 \cdot 0,73 + 3,2 \cdot 0,73 + 1,6 \cdot 0,73 + 1,6 \cdot 0,73) + (1,75 \cdot 0,33 + 2 \cdot 0,33 + \\
& + 2,5 \cdot 0,33 + 3 \cdot 0,33 + 3 \cdot 0,07 + 3 \cdot 0,73 + 2 \cdot 0,73 + 1,5 \cdot 0,73 + 1 \cdot 0,73 + \\
& + 1 \cdot 0,73) + (0,75 \cdot 0,33 + 0,75 \cdot 0,33 + 1 \cdot 0,33 + 1 \cdot 0,33 + 1,25 \cdot 0,07 + \\
& + 1 \cdot 0,73 + 0,75 \cdot 0,73 + 0,75 \cdot 0,73 + 0,05 \cdot 0,73 + 0,01 \cdot 0,73 + 0,1 \cdot 0,73 + \\
& + 0,5 \cdot 0,73) = 28,7 \text{ млн руб.}
\end{aligned}$$

Таким образом, прямой ущерб составляет 28,7 млн руб. С учетом косвенного ущерба полный ущерб может быть значительно больше.

2.6. Оценка вероятности поражения объектов в зависимости от их сейсмостойкости и сейсмичности района

Сейсмическая опасность для различных объектов предопределяется преимущественно плотностью потока землетрясений (количеством землетрясений в единицу времени), а также их сейсмостойкостью. Необходимым условием для поражения объекта является совпадение двух событий: первое событие – в регионе произошло землетрясение, второе – объект попал в зону поражения этого землетрясения.

Тогда вероятность поражения объекта $P_{\text{п}}$ можно представить в виде [15,23]

$$P_{\text{п}} = P_1 \cdot P_2, \quad (2.30)$$

где P_1 - вероятность возникновения землетрясения в регионе за промежуток времени T ; P_2 – вероятность попадания объекта, расположенного в регионе, в зону поражения происшедшего землетрясения.

Поток землетрясений подчинен распределению Пуассона. В этом случае вероятность того, что за период времени T произойдет не менее одного землетрясения интенсивностью I_0 по аналогии с (2.25) составит

$$P_1 = 1 - e^{-\mu_{I_0} T}, \quad (2.31)$$

где μ_{I_0} – плотность потока в регионе, создаваемого землетрясениями I_0 -й интенсивности.

Плотность потока μ_{I_0} можно представить в виде

$$\mu_{I_0} = \frac{N_{I_0}}{T} = \frac{N_{I_0}}{N_*} \cdot \frac{N_*}{T} = P_{I_0} \cdot \mu_*,$$

где N_{I_0} – число землетрясений в регионе I_0 -й интенсивности за период времени T ; N_* – общее число землетрясений в этом регионе за тот же период времени; P_{I_0} – вероятность реализации хотя бы одного землетрясения I_0 -й интенсивности в данном регионе; μ_* – суммарная плотность потока землетрясений в регионе.

Подставляя в соотношение (2.31) значение $\mu_{I_0} = P_{I_0} \mu_*$, нетрудно получить

$$P_1 = 1 - e^{-\mu_* P_{I_0} T}. \quad (2.32)$$

Вероятность P_2 определяется отношением площади поражения (S_n), создаваемой происшедшим землетрясением, к площади региона (S):

$$P_2 = \begin{cases} \frac{S_n}{S} & \text{при } S > S_n, \\ 1 & \text{при } S \leq S_n. \end{cases} \quad (2.33)$$

Аппроксимируя площадь поражения S_n равновеликой площадью круга $S_n = \pi R_n^2$ можно получить зависимость его радиуса от интенсивности землетрясения по аналогии с соотношением (1.76) в виде (при условии применимости формулы (1.51))

$$R_n = H \sqrt{10^{0,571(I_0 - I_n)} - 1}. \quad (2.34)$$

Подставив величину R_n в соотношение (2.33), нетрудно получить

$$P_2 = \frac{\pi H^2}{S} \left[10^{0,571(I_0 - I_n)} - 1 \right], \quad (2.35)$$

где I_0 – интенсивность землетрясения в эпицентре; I_n – интенсивность землетрясения, при которой и больших ее значениях происходит поражение объекта.

Подстановка значений P_1 , P_2 соотношение (2.30) приводит его к виду

$$P_{nI_0} = \frac{\pi H^2}{S} \left[10^{0,571(I_0 - I_n)} - 1 \right] \cdot \left(1 - e^{-\mu P_0 T} \right). \quad (2.36)$$

Выражение (2.36) определяет вероятность поражения объекта землетрясениями определенной интенсивности I_0 при условии, что $I_0 > I_n$. Опасными для рассматриваемого объекта являются все землетрясения, интенсивность которых превышает его сейсмостойкость, поэтому в формуле (2.36) следует принимать $I_n = I_c$, где I_c – сейсмостойкость объекта [23]. Значения I_c для ряда сооружений приведены в п. 1.12.

Вероятность поражения объекта с учетом землетрясений не одной интенсивности I_0 , но и других возможных землетрясений интенсивностью $I_n < I_0 < 12$ баллов, составит

$$P_n = 1 - \prod_{I_0=I_n}^{12} (1 - P_{nI_0}) = \\ = \prod_{I_0=I_n}^{12} \left[1 - \frac{\pi H^2}{S} \left(10^{0,571(I_0 - I_n)} - 1 \right) \cdot \left(1 - e^{-\mu P_0 T} \right) \right]. \quad (2.37)$$

Необходимо отметить, что за время T возможно накопление деформаций зданий, сооружений от землетрясений интенсивностью $I_0 < I_c$, что может привести к снижению предела сейсмостойкости I_c . На величине I_c сказывается также процесс старения строительных конструкций за время T . При выводе формулы (2.37) изменение значения I_c от действия таких факторов не учитывалось.

При проведении расчетов по формуле (2.37) необходимо знать:

- суммарную плотность потока землетрясений μ_* в регионе;
- осредненное значение глубины очагов землетрясений в регионе;
- вероятность P_{I_0} землетрясений интенсивностью I_0 в данном

регионе.

Согласно рекомендациям [23] величину P_{I_0} можно представить в виде

$$P_{I_0} = P_{(\leq I_0)} - P_{(\leq I_0 - 1)} = e^{-4,84[(I_0 - 1)/I_m - 0,59]^2} - e^{-4,84[(I_0)/I_m - 0,59]^2}, \quad (2.38)$$

где $P_{(\leq I_0)} = e^{-4,84[(I_0)/I_m - 0,59]^2}$, $P_{(\leq I_0-1)} = 1 - e^{-4,84[(I_0-1)/I_m - 0,59]^2}$.

В формуле (2.38) величины $P_{(\leq I_0)}$, $P_{(\leq I_0-1)}$ – вероятности реализаций в регионе землетрясений не более I_0 и $(I_0 - 1)$ интенсивностей соответственно, I_m – математическое ожидание интенсивности землетрясения в регионе.

Значения μ_* , I_m для отдельных регионов нашей страны приведены в табл. 17. В этой таблице приведены также значения P_{I_0} , рассчитанные по формуле (2.38), и осредненные величины глубин очагов землетрясений H , км [23, 31].

Таблица 17

Значения величин μ_* , I_m , P_{I_0} , H для регионов СНГ

Ре- гион	I_m балл	μ_*	H , км	P_{I_0}							
				$I_0=5$	6	7	8	9	10	11	12
1	8,1	0,74	20	0,01	0,10	0,20	0,23	0,20	0,13	0,08	0,03
2	7,8	1,32	50	0,02	0,13	0,22	0,23	0,18	0,12	0,06	0,02
3	6,7	1,73	20	0,11	0,25	0,27	0,18	0,13	0,04	0,02	0
4	6,3	0,41	30	0,17	0,29	0,26	0,16	0,07	0,03	0,01	0
5	6,3	0,81	20	0,17	0,29	0,26	0,16	0,07	0,03	0,01	0
6	6,2	2,15	100	0,19	0,30	0,25	0,25	0,06	0,02	0,01	0
7	6,3	5,61	20	0,16	0,29	0,26	0,16	0,07	0,03	0,01	0
8	6,1	1,13	20	0,20	0,30	0,25	0,14	0,06	0,02	0,01	0
9	5,8	0,91	20	0,25	0,31	0,23	0,11	0,04	0,01	0	0
10	5,6	11,4	20	0,29	0,32	0,20	0,09	0,03	0	0	0
11	5,4	0,43	30	0,32	0,31	0,18	0,07	0,02	0	0	0
12	5,0	0,34	20	0,36	0,28	0,12	0,03	0,01	0	0	0
13	5,0	1,28	40	0,36	0,28	0,12	0,03	0,01	0	0	0

Пр и м е ч а н и е. Номера регионов: 1 – Прибайкалье, 2 – Камчатка, 3 – Западная Туркмения, 4 – Якутия и Северо-Восток, 5 – Алтай и Саяны, 6 – Курилы, 7 – Средняя Азия и Казахстан, 8 – Карпаты, 9 – Сахалин, 10 – Кавказ, 11 – Приамурье и Приморье, 12 – Европейская часть России, Урал, Западная Сибирь, 13 – Крым и Нижняя Кубань.

При известном значении вероятности поражения P_n вероятность его сохранности P_c за время T оценивается по соотношению

$$P_n = \prod_{I_0=I_n}^{12} (1 - P_{nI_0}) = \prod_{I_0=I_n}^{12} \left[1 - \frac{\pi H^2}{S} (10^{0,571(I_0-I_c)} - 1) \cdot (1 - e^{-\mu_* P_{I_0} T}) \right]. \quad (2.39)$$

Пример. Определить вероятность поражения сейсмостойкого промышленного здания с металлическим каркасом в г. Бийске (регионы Алтай и Саяны) в течение срока его службы при следующих исходных данных: сейсмостойкость здания $I_c = 8$ баллов, срок службы здания $T = 100$ лет, площадь региона $S = 262 \cdot 10^3 \text{ км}^2$.

Решение: 1. По табл. 17 находим:

- плотность потока землетрясений в регионе $\mu_* = 0,81$;
- осредненная глубина гипоцентра $H = 20$ км;
- вероятность землетрясений, интенсивность которых равна и превышает сейсмостойкость здания,

$$P_{I_0=8} = 0,16; P_{I_0=9} = 0,07; P_{I_0=10} = 0,03; P_{I_0=11} = 0,01; P_{I_0=12} = 0.$$

2. По соотношению (2.34) вычисляем значения радиусов поражения здания при интенсивности землетрясения $I_0 \geq I_c$:

$$R_n \Big|_{I_0=8} = 20\sqrt{10^{0,571(8-8)} - 1} = 0; \quad R_n \Big|_{I_0=9} = 20\sqrt{10^{0,571(9-8)} - 1} = 33 \text{ км};$$

$$R_n \Big|_{I_0=10} = 71,8 \text{ км}; \quad R_n \Big|_{I_0=11} = 180 \text{ км}; \quad R_n \Big|_{I_0=12} = 276 \text{ км}.$$

3. По формуле (2.32) вычисляем вероятность землетрясений интенсивностью $I_0 = 8$ баллов (не менее одного) за период времени $T = 100$ лет:

$$P_1 \Big|_{I_0=8} = 1 - e^{-0,81 \cdot 0,16 \cdot 100} \approx 1.$$

Аналогично находим $P_1 \Big|_{I_0=9} = 0,997$; $P_1 \Big|_{I_0=10} = 0,912$;

$$P_1 \Big|_{I_0=11} = 0,555; \quad P_1 \Big|_{I_0=12} = 0.$$

4. По формуле (2.35) вычисляем вероятность попадания здания в зону поражения землетрясения интенсивностью $I_0 = 8$ баллов:

$$P_1 \Big|_{I_0=8} = \frac{3,14 \cdot 20^2}{262 \cdot 10^3} [10^{0,571(8-8)} - 1] = 0.$$

Аналогично находим $P_1|_{I_0=9} = 0,013$; $P_1|_{I_0=10} = 0,062$;
 $P_1|_{I_0=11} = 0,243$; $P_1|_{I_0=12} = 0,920$.

5. По формуле (2.37) определяем вероятность поражения здания

$$P_n = 1 - (1 - 1 \cdot 0) \cdot (1 - 0,997 \cdot 0,013) \cdot (1 - 0,912 \cdot 0,062) \cdot (1 - 0,555 \cdot 0,243) \times \\ \times (1 - 0 \cdot 0,920) = 0,20.$$

2.7. Сейсмический риск

Сейсмический риск – это опасность повреждений зданий, сооружений от землетрясений в данном регионе. [13] Он определяется как вероятность реализации не менее одного землетрясения, наносящего ущерб различным объектам, по формуле (2.25), которая представляется в виде

$$R = 1 - e^{-\mu^* T}, \quad (2.40)$$

где R – сейсмический риск; μ^* – плотность потока землетрясений интенсивностью $I_0 \geq I_c$; T – заданный временной интервал; I_c – сейсмостойкость сооружений.

Пример. В данном регионе происходит в среднем два сильных землетрясения, способных нанести повреждения различным сооружениям, в течение 100 лет. Оценить сейсмический риск за период эксплуатации сооружений 25 лет.

Решение: 1. Находим плотность потока сильных землетрясений:

$$\mu^* = 2/100 = 0,02.$$

2. По формуле (2.40) вычисляем сейсмический риск:

$$R = 1 - e^{-0,02 \cdot 25} = 1 - 0,61 = 0,39.$$

Глава 3. УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ

3.1. Реология грунтов

Склоны гор, холмов, оврагов, лощин под действием силы тяжести могут потерять устойчивость и разрушиться, вызвав тяжёлые последствия. Катастрофические явления, происходящие на склонах, необязательно должны быть быстрыми. Медленное, но неуправляемое скольжение в море берега вместе с расположенными на нём сооружениями в течение года или нескольких лет опасно, как и быстрое смещение.

Динамика движения склонов после потери ими устойчивости существенно зависит от состава слагающих пород. Обычно выделяют рыхлые и скальные грунты.

К скальным грунтам относится обширная группа изверженных горных пород (граниты, гранодиориты, порфириды, габбро, базальты, и др.) и прочных метаморфизированных осадочных пород (известняки, песчаники, туфы). Условная граница существования скальных пород определяется соотношением $N_p > N_p^*$, где N_p – скорость распространения продольных волн в массиве, $N_p^* = (4...4,5) \cdot 10^3$ м/с – для изверженных пород и $N_p^* \approx 2000$ м/с – для осадочных метаморфизированных.

К рыхлым (мягким) грунтам относят глины, суглинки, лёссы, пески. Эти осадочные отложения покрывают слоем различной толщины подавляющую часть территории суши. От скальных грунтов они отличаются существенно большей пористостью $\sim (30...50)\%$, влажностью (содержат значительное количество несвязной воды) и на два – три порядка меньшей прочностью.

Условная граница существования мягких грунтов определяется соотношением $N_p < (1,8...2) \cdot 10^3$ м/с.

Известняки, песчаники, туфы иногда называют полускальными грунтами.

Они обладают сравнительно прочным скелетом и значительной общей пористостью. От прочных скальных грунтов их отличает пониженное значение скорости распространения упругих волн и прочности, а от мягких грунтов, – наоборот, повышенное значение прочности и скорости распространения упругих волн. Для таких грунтов имеют место соотношения

$1,5 \cdot 10^3 < N_p < 4 \cdot 10^3$ м/с, $10\% < p < 50\%$, где p – пористость.

Рыхлые грунты состоят в основном из скоплений отдельных зёрен и частиц. Связность этих скоплений зависит от внутреннего сцепления и трения между зёрнами. Размеры зёрен и частиц несоизмеримо малы по сравнению с масштабом изучаемого явления. В скальных массивах размеры составляющих элементов значительно больше. Они представлены блоками, ограниченными системами трещин, присутствующими в любом таком массиве. Трещины могут варьироваться в широком диапазоне от микротрещин шириной менее 1 микрона с очень небольшой поверхностью до тектонических нарушений, являющихся геологическими разрывами. Ограниченные трещинами блоки по размерам могут быть сравнимы с масштабом рассматриваемого явления – движущегося склона. Отмеченные особенности строения грунтов необходимо учитывать при оценке устойчивости склонов.

Известно, что напряжённое состояние в точке деформируемого тела определяется тензором напряжений. Связь упругих деформаций с напряжениями согласно обобщённому закону Гука находится по уравнениям (1.26).

При возрастании нагрузки деформации возрастают. При значительном возрастании нагрузки в породах образуются трещины, происходит разрушение грунтового материала. Однако отклонения от упругости наблюдаются раньше, до трещинообразования.

Медленные продолжительные неупругие деформации, происходящие в теле под действием нагрузки, превышающей предел пластичности, обозначаются в механике грунтов специальным термином – ползучесть. С ползучестью связан, например, случай медленного скольжения берегового склона (и ряд других случаев).

Ещё большую опасность представляет быстрое разрушение склона, когда практически невозможно или затруднительно обеспечить меры безопасности.

Задача определения условий разрушения склона имеет, таким образом, большую практическую значимость.

Установлено, что разрушение склона, сложенного из рыхлых грунтов, происходит при сдвиговых деформациях. Предельное сдвигающее напряжение определяется по закону Кулона [11]:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi + C, \quad (3.1)$$

где τ – касательное напряжение; σ – нормальное напряжение; φ – угол внутреннего трения рассматриваемого грунта; C – сцепление.

Значения φ и C для разных материалов различны. Для песка $\varphi = 33^\circ$, осыпи из рыхлого лёсса и мергелей $\approx 25^\circ$, сланца ($26 \div 29$) $^\circ$, известняка 32° , гнейса 34° , гранита ($35 \div 40$) $^\circ$. В глинах угол внутреннего трения близок к нулю. Сцепление C изменяется от близкого к нулю в очень влажных глинах, находящихся в жидком состоянии, до 10^7 Па в высушенной горячим воздухом глине. В рыхлых слоях песка и в щебне возможно значение $C \approx 0$.

В этом случае φ является углом склона, круче которого насыпь из этого материала не может быть устойчивой (угол естественного откоса). Для скальных грунтов важно установить условия образования трещин.

Предел прочности гранита на сжатие составляет $\sim 3 \cdot 10^8$ Па, предел прочности на скалывание для большинства пород (мрамор, известняк, песчаник) составляет примерно 10^8 Па, прочность пород на разрыв значительно ниже и может составлять примерно 10^6 Па.

3.2. Устойчивость склонов, сложенных рыхлыми и скальными породами

Устойчивость склонов из рыхлых грунтов определяется по уравнению Кулона (3.1). Возможные поверхности скольжения обычно представляют цилиндрическими, что позволяет исследовать один профиль склона, ограничившись решением плоской задачи (рис. 18, 19).

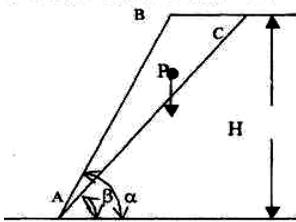


Рис. 18. Схема обрушения склона по плоской поверхности скольжения

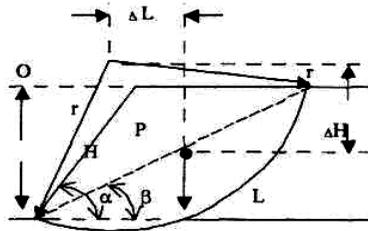


Рис. 19. Схема обрушения склона по круглоцилиндрической поверхности скольжения

Самым простым допущением в отношении формы потенциальной поверхности скольжения является плоскость (рис. 18). На этом рисунке обозначено: P – вес клина ABC , H – высота откоса, α – угол откоса, β – угол наклона плоскости скольжения.

Согласно уравнению (3.1) массив ABC находится в равновесии, если

$$P \cdot \sin \beta = P \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{CH}{P \sin \beta}, \quad (3.2)$$

где φ – угол внутреннего трения грунтового материала; C – сцепление.

Устойчивость этого массива определяется величиной коэффициента:

$$\chi = \frac{P \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{CH}{\sin \beta}}{P \sin \beta}. \quad (3.3)$$

При $\chi > 1$ массив устойчив; при $\chi < 1$ массив обрушится.

Коэффициент χ называется коэффициентом устойчивости.

В практике проведения различных инженерных и строительных работ нередко требуется установить предельную высоту склона, при которой он сохраняет устойчивость, и положение возможной поверхности скольжения при потере устойчивости.

Вес массива ABC (принимая его толщину равной единице измерения) составляет

$$P = \rho g \cdot \frac{H^2 \sin(\alpha - \beta)}{2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}, \quad (3.4)$$

где ρ – плотность грунта; g – ускорение свободного падения.

Положение возможной поверхности скольжения наиболее опасно, так как для обеспечения равновесия необходимо обеспечить максимальное сцепление C (на других поверхностях равновесие обеспечивается при меньших значениях C). Решая уравнения (3.2) и (3.4) относительно C и принимая $\frac{\partial C}{\partial \beta} = 0$, можно определить наклон

поверхности скольжения:

$$\beta = \frac{1}{2}(\alpha + \varphi). \quad (3.5)$$

Подставляя данное соотношение в уравнение (3.2) и решая его относительно H , можно найти критическую высоту $H_{кр}$, при которой сохраняется устойчивость склона [11]:

$$H_{\text{кр}} = \frac{C}{\rho g} \cdot \frac{2 \sin \alpha \cos \varphi}{\sin^2 [0,5 \cdot (\alpha + \varphi)]} = \frac{C}{\rho g} \cdot \psi(\alpha, \varphi), \quad (3.6)$$

где $\psi(\alpha, \varphi)$ – играет роль коэффициента устойчивости.

Значения коэффициента $\psi(\alpha, \varphi)$ приведены на рисунке 22, а; при $\varphi = 0$ (водонасыщенные глины) $\psi(\alpha, \varphi) = 4 \text{ctg } \alpha/2$.

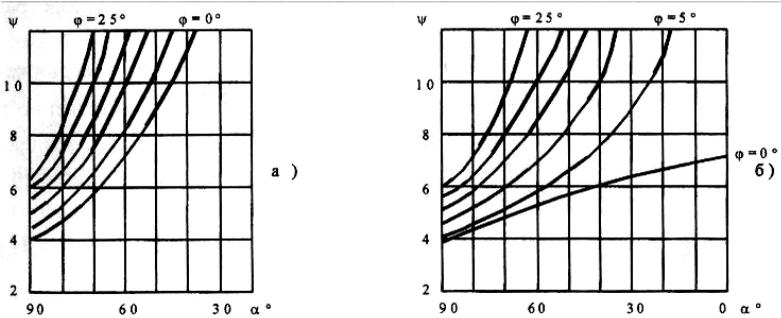


Рис. 20. Значения коэффициента ψ для моделей обрушения откосов с плоской (а) и круглоцилиндрической (б) поверхностями скольжения

В случае, если поверхность скольжения имеет круглоцилиндрическую форму (рис. 19) критическая высота откоса $H_{\text{кр}}$ находится по соотношению [11]

$$H_{\text{кр}} = \frac{C}{\rho g} \cdot \psi(\alpha, \beta, \varphi), \quad (3.7)$$

где значения коэффициента $\psi(\alpha, \beta, \varphi)$ снимаются с графиков (рис. 20, б).

Положение круглоцилиндрической поверхности скольжения находится методом последовательных приближений. Определяется такое положение этой поверхности (задаются положение центра вращения O и величина радиуса r), при котором для поддержания равновесия рассматриваемого массива требуется наибольшая величина сцепления.

По условию равновесия сумма моментов всех сил относительно центра вращения должна равняться нулю. Например, при $\varphi = 0$ условие равновесия применительно к схеме (рис. 19) может быть представлено в виде

$$P \cdot \Delta L - C \cdot l \cdot r = 0. \quad (3.8)$$

Коэффициент устойчивости склона

$$\chi = \frac{C \cdot l \cdot r}{P \cdot \Delta L}. \quad (3.9)$$

Склон теряет устойчивость при $\chi < 1$.

Следует отметить, что землетрясение может спровоцировать обрушение склона. Как отмечалось ранее в п. 1.7, при землетрясении имеют место горизонтальные и вертикальные ускорения грунта, обусловленные продольной, поперечной и поверхностной сейсмическими волнами. Для получения представления о механизме воздействия землетрясений рассмотрим случай воздействия горизонтальных ускорений, имеющий место при распространении продольной волны.

Согласно принципу Д'Аламбера, воздействие ускорения \ddot{x} на движение массы m равно приложению силы $m \ddot{x}$ к этой массе. Соответственно в расчёте устойчивости нужно добавить силу $m \ddot{x}$ к другим силам, действующим на массу m . Обращаясь к рис. 19, можно выразить коэффициент устойчивости склона в виде (при $\varphi = 0$)

$$\chi = \frac{C \cdot l \cdot r}{P \cdot \left(\Delta L + \Delta H \cdot \frac{\ddot{x}}{g} \right)}. \quad (3.10)$$

При оценке устойчивости склонов, сложенных скальными породами следует иметь в виду, что потенциальные поверхности скольжения чаще всего имеют форму, предопределённую наиболее распространёнными системами трещин. При этом сцепление по поверхностям трещин может быть близким к нулю.

Пусть смещение части скального откоса происходит по ранее образованным трещинам (или трещине)(рис. 21).

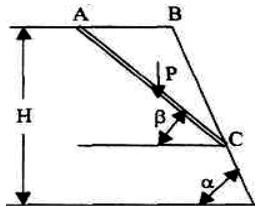


Рис. 21. Склон, пересекаемый трещиной

Условие скольжения блока ABC можно записать в виде

$$P \sin \beta = P \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi', \quad (3.11)$$

где P – вес блока; φ' – угол трения по трещине.

Коэффициент устойчивости блока ABC

$$\chi_* = \operatorname{ctg} \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi'. \quad (3.12)$$

3.3. Оползни

Оползни – это смещение на более низкий уровень части горных пород, слагающих склон, в виде скользящего движения в основном без потери контакта между движущимися и неподвижными породами. Движение оползня начинается вследствие нарушения равновесия склона и продолжается до достижения нового состояния равновесия. Перемещение значительной массы породы, вызванное оползнем, может привести к тяжёлым последствиям. Оползни могут разрушить различные объекты, а в некоторых случаях и населённые пункты, погубить сельскохозяйственные угодья, повредить коммуникации, туннели, телефонные и электрические сети, угрожать водохозяйственным сооружениям (плотинам).

Основные причины образования оползней: чрезмерная крутизна склона (откоса); перегрузка верхней части склона инженерными сооружениями; нарушение целостности пород склона оврагами, траншеями; подрезка склона у его подошвы; увлажнение подошвы склона; смачивание плоскостей напластования (контактов) подземными водами в результате обильных дождевых осадков и бурного таяния снега [14].

Движение оползня начинается с момента, когда коэффициент устойчивости склона, определяемый согласно рекомендациям предыдущего параграфа, становится меньше единицы.

Для получения представления о последующем движении оползня рассмотрим два важных частных случая: когда его тело сложено из глинистых пород и из скальных пород.

В первом случае сопротивление движению оползня обычно определяют сцеплением C (угол внутреннего трения глин $\varphi \approx 0$).

Энергетический баланс массы m , смещающейся вниз по склону под углом β (рис. 22), может быть представлен в виде

$$\frac{1}{2}mv^2 = mg \cdot \Delta H - CL \cdot \frac{\Delta H}{\sin \beta}, \quad (3.13)$$

где mg – вес оползня; ΔH – его вертикальное смещение; L – площадь контакта оползня; CL – сила сцепления; $\frac{\Delta H}{\sin \beta}$ – смещение по склону; v – скорость оползня.

Принимая ширину оползня, равной единице измерения, его массу можно представить в виде $m = \rho L \delta$, где δ – средняя толщина (мощность) оползня, ρ – плотность материала. Тогда

$$v^2 = 2 \cdot \left(g - \frac{C}{\rho \delta \sin \beta} \right) \cdot \Delta H. \quad (3.14)$$

Видно, что при $\beta = \text{const}$ возникающий оползень продолжает смещаться с нарастающей скоростью (при изменении величины ΔH от 0 до H). Во втором случае сопротивление движению оползня определяется не сцеплением, а коэффициентом сухого трения f . Энергетический баланс массы оползня, смещающейся по склону, запишется в виде

$$\frac{1}{2}mv^2 = mg \cdot \Delta H - mg \cdot f \Delta H \cdot \text{ctg} \beta, \quad (3.15)$$

где используются те же обозначения, что и в соотношениях (3.13) и (3.14).

Принимая, что $f \approx \text{tg} \varphi$, где φ – угол внутреннего трения материала оползня (близкий к углу естественного откоса), можно получить

$$v^2 = 2g\Delta H \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \beta} \right). \quad (3.16)$$

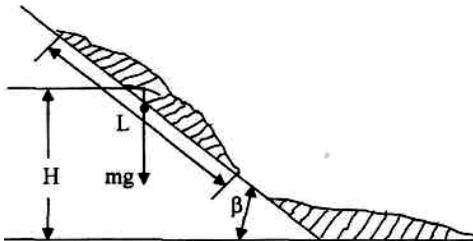


Рис. 22. Схема оползня

Видно, что образовавшийся оползень смещается вниз по склону также с нарастающей скоростью. Кроме того, смещение из неподвижного состояния произойдёт только при условии

$$\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\beta} < 1,$$

или $\alpha < \beta$. Оползень прекращает движение на равнине у подножия склона (рис. 22).

Следует отметить, что коэффициент устойчивости склона со временем может меняться. Так при проведении специальных инженерных мероприятий он может увеличиться, но обычно в результате негативных природных явлений и ошибок хозяйственной деятельности человека он уменьшается. Учёт таких воздействий проводится введением в коэффициент устойчивости определённых поправок [14].

Для определения поправок рассчитывают среднее годовое уменьшение коэффициента устойчивости за год $\Delta\chi$. Находят зависимость амплитуды обратимых колебаний коэффициента устойчивости от негативных воздействий и вычисляют среднюю величину амплитуды его отрицательного отклонения $\Delta\chi_{\text{cp}}$ и максимальную её величину $\Delta\chi_{\text{max}}$ за период времени T .

Определяют возможность оползня в конце периода T по соотношению

$$\chi = \chi_0 - T \cdot \Delta\chi, \quad (3.17)$$

где χ – коэффициент устойчивости склона в конце периода T ; χ_0 – начальное значение коэффициента устойчивости. Если $\chi - \Delta\chi_{\text{max}} > 1$, то оползень маловероятен; если $\chi - \Delta\chi_{\text{max}} < 1$, то оползень возможен; если $\chi - \Delta\chi_{\text{cp}} < 1$, то вероятность оползня велика.

Вероятное время возникновения оползня T^* оценивают по соотношению

$$\frac{(\chi_0 - \Delta\chi_{\text{max}} - 1)}{\Delta\chi} < T^* < \frac{(\chi_0 - \Delta\chi_{\text{cp}} - 1)}{\Delta\chi}. \quad (3.18)$$

Пример. Определить вероятное время возникновения оползня. Начальное значение коэффициента устойчивости склона $\chi_0 = 1,27$.

Среднее годовое уменьшение коэффициента устойчивости вследствие равномерного подмыва подошвы склона $\Delta\chi = 5 \cdot 10^{-3}$. Среднее годовое отрицательное отклонение коэффициента устойчивости в результате колебаний водонасыщенности склона составляет $\Delta\chi_{\text{ср}} = 0,03$; максимальное отрицательное отклонение коэффициента устойчивости за 50 лет $\Delta\chi_{\text{max}} = 0,1$.

Решение. Время вероятного смещения оползня вычисляем по соотношению (3.18)

$$\frac{1,27 - 0,1 - 1}{0,005} < T_* < \frac{1,27 - 0,03 - 1}{0,005},$$

то есть через 34...48 лет.

3.4. Обвалы. Горные удары

Обвалы происходят на крутых скальных уступах. Может произойти обвал одной глыбы или целого массива. Десятки тысяч тонн породы при потере устойчивости могут внезапно отделиться и рухнуть вниз. Возможность обвала определяется по соотношению (3.17), где под величиной χ_0 в этом случае подразумевается значение χ_* из (3.12).

Во время движения скорость обвала возрастает. Из соотношения (3.16) следует, что для крутых склонов, когда угол $\beta \rightarrow 90^\circ$, величина, $\text{tg}\beta \rightarrow \infty$, при этом $v^2 \approx 2g\Delta H$. В конце движения, когда величина ΔH становится равной H , скорость движущегося массива составляет $v^2 \approx 2gH$. При такой скорости движущийся грунтовый массив обладает большой разрушительной силой.

Горным ударом называется внезапное, очень быстрое разрушение некоторой части скального массива, происходящее в виде откола (в технической литературе используется термин «отстрел»). При этом по скальному массиву распространяется система упругих волн (типа волн, описанных в п. 1.11), воспринимаемых как удар или серия ударов.

На рис. 23 схематично изображён подработанный вертикальный откос, разрушение которого может привести к горному удару. Пунктирная линия на этом рисунке соответствует поверхности максимальных растягивающих напряжений, нормальных к поверхности вертикального откоса. Если растягивающие напряжения превзойдут предел прочности скального грунта на разрыв, произойдёт откол.



Рис. 23. Схема разрушения ослабленного вертикального склона

Механизм горных ударов связан с внезапным высвобождением накопленной упругой энергии при отколе ослабленной части скального массива. Потенциальная энергия напряжений рассматривалась ранее в п. 1.6. Высвобождаемая энергия определяет масштаб последствий горных ударов.

3.5. Скатывающиеся камни

Оползни, обвалы на откосе из скального грунта, а также сотрясения скального массива при землетрясениях, взрывах и т.п. обычно сопровождаются скатыванием по склону камней (используется термин «камнепад»).

При исследовании процесса скатывания камней в приближённых расчётах используется модель камня в форме шара, катящегося вниз по наклонной плоскости (рис. 24).

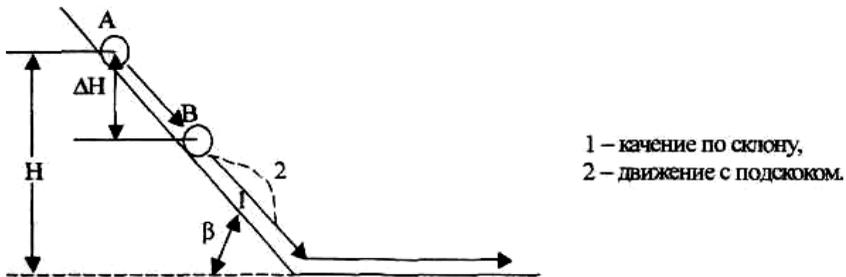


Рис. 24. Схема движения камня по склону

Пусть v — линейная скорость скатывающегося камня. Кинетическая энергия камня определяется соотношением [32]

$$E_{\hat{e}} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (3.19)$$

где m – масса камня; J – момент инерции; ω – угловая скорость вращения катящегося камня.

Известно, что

$$J = \frac{2}{5}mr^2,$$

$$\omega = \frac{v}{r}, \quad (3.20)$$

где r – радиус.

Тогда

$$E_{\hat{e}} = \frac{1}{2}mv^2 \left(1 + \frac{2}{5} \right) = \frac{7}{10}mv^2. \quad (3.21)$$

Энергетический баланс камня при его движении от точки A , отвечающей положению покоя, до точки B на рис. 24 можно по аналогии с соотношением (3.15) представить в виде

$$\frac{7}{10} \cdot mv^2 = mg \cdot \Delta H - mg \cdot \Delta H \cdot f_* \cdot \operatorname{ctg}\beta, \quad (3.22)$$

где f_* – коэффициент трения качения.

Из выражения (3.22) нетрудно получить

$$v^2 = \frac{10}{7}g\Delta H(1 - f_* \cdot \operatorname{ctg}\beta). \quad (3.23)$$

Согласно [32], трение качение в несколько раз ниже чем трение скольжения. При известном значении f_* расчет скорости v не встречает затруднений. Видно, что при движении камня по склону его скорость возрастает.

Соотношение (3.23) позволяет решить и обратную задачу: определить коэффициент трения качения камня, если известна его

скорость движения в конце склона. Разрешая это соотношение относительно f_* , нетрудно получить

$$f_* = \left(1 - \frac{7}{10} \frac{v^2}{gH} \right) \operatorname{tg} \beta. \quad (3.24)$$

Довольно часто при движении по склону скатывающихся камней наблюдается явление «подкоса» (рис. 23). Подкос происходит, если на пути движения камня встречается не высокое препятствие или имеет место неровность склона. При движении камня по воздушной траектории его скорость увеличивается быстрее. При большой длине склона подкос может повториться несколько раз.

Катящийся по склону и летящий по воздуху с большой скоростью камни представляют значительную опасность для человека и транспортных средств, движущихся по горным дорогам.

Пример. Определить коэффициент трения качения камня, катящегося по склону, если в конце склона у подошвы его скорость составляет 14 м/с. Высота склона 20 м, угол наклона склона 45° .

Решение. Коэффициент трения качения находим по соотношению (3.24)

$$f_* = \left(1 - \frac{7 \cdot 14^2}{10 \cdot 9,81 \cdot 20} \right) \cdot 1 = 0,26.$$

Для сравнения: коэффициент трения скольжения камня составляет $f \approx 0,6 \div 0,9$ [11].

3.6. Снежные лавины

Лавина – обвал массы снега на горных склонах, пришедших в интенсивное движение. Снежные лавины представляют серьезную опасность. В результате их схода гибнут люди, уничтожаются материальные ценности, парализуется работа транспорта, блокируются целые районы. Лавины чаще всего наблюдаются на склонах крутизной от 20° до 50° при толщине снежного покрова не менее 30...50 см. Для схода лавины необходимо определенное сочетание лавинообразующих

факторов. К их числу относят: высота слоя старого снега, состояние подстилающей поверхности, высота слоя свежего снега, плотность снега, интенсивность снегопадов, температурный режим воздуха. В тёплую погоду сход лавин является следствием интенсивного таяния снега под воздействием тепла и солнечной радиации, приводящих к разрыхлению снежной толщи и ослаблению прочности и несущей способности отдельных слоев.

Прогнозирование лавин заключается в определении периода, во время которого действие лавинообразующих факторов наиболее опасно. Наиболее распространённые признаки лавинной опасности показаны на схеме (рис. 25).



Рис. 25. Признаки лавинной опасности

Следует отметить, что до 70% всех лавин обусловлены снегопадами. Они сходят во время снегопадов или в течение 1...2 суток после их прекращения. Формирование лавин происходит в лавинном очаге, представляющем собой участок склона и его подножия, в пределах которых движется лавина. Различают три зоны лавинного очага: зона зарождения (лавиносор), зона транзита (лоток), зона остановки (конус выноса). Классификация лавин, учитывающая природу их формирования, дана в табл. 18 [14].

Классификация снежных лавин

Тип лавины	Особенности
Лотковая	Движение по фиксированному руслу
Осов (склоновая)	Отрыв и движение по всей поверхности склона
Прыгающая	Свободное падение с уступов склонов
Пластовая	Движение по поверхности нижележащего слоя снега
Грунтовая	Движение по поверхности грунта
Сухая	Сухой снег в лавинном очаге
Мокрая	Мокрый снег в лавинном очаге

Количественные характеристики лавин приведены в табл. 19. Лавина объёмом 10 м^3 представляет опасность для человека, автомобиля. Более крупные лавины способны разрушить капитальные инженерные сооружения, образовывать завалы на дорогах [14].

Таблица 19

Основные характеристики снежных лавин

Параметр	Величина
Объём V , м^3	от единиц до 10^7
Плотность лавинного снега ρ , $\text{г}/\text{м}^3$:	
мокрая лавина	0,3...0,8
сухая лавина	0,2...0,4
Скорость движения v , $\text{м}/\text{с}$:	
мокрая лавина	10...20
сухая лавина	20...100
Динамическое давление P , МПа	до 0,4...2
Высота фронта лавины H , м	от долей до 10
Площадь сечения лавинного потока, м^2	от единиц до 10^3
Дальность выброса L_{max} , м	до 2000
Повторяемость, ед./год	0,01...20

Движение сухой лавины обычно сопровождается снежно-пылевым облаком. В отдельных случаях (при высокой скорости фронта лавины, высокой плотности снежно-пылевого облака) перед фронтом лавины возникает ударная волна. Действие такой волны сходно с действием ударной волны взрыва.

Действие водонасыщенной лавины сходно с действием воздухомышленной жидкости или селевого потока.

Следует отметить, что сила удара (давление) снежных лавин на вертикальную преграду в отдельных случаях может достигать 0,4 МПа,

а при наличии в лавине твёрдых включений может превышать это значение в несколько раз.

Основные параметры лавины определяются по нижеследующим формулам [14].

Степень устойчивости снежных масс оценивается коэффициентом устойчивости:

$$\chi = \frac{\tau_{\text{л}}}{\tau}, \quad (3.25)$$

где $\tau_{\text{л}}$ – предельное сопротивление сдвигу плоскости возможного скольжения; τ – касательное напряжение в этой плоскости от собственного веса снега.

При $\chi < 4$ – возникновение лавины возможно; $\chi < 1$ – возникновение лавины неизбежно.

Объём лавины, м^3 ,

$$V_{\text{ср}} = 0,5 \cdot S \cdot h_{\text{ср}}, \quad (3.26)$$

где S – лавиноактивная площадь, м^2 ; $h_{\text{ср}}$ – средняя высота снежного покрова.

Скорость лавины, м/с ,

$$v = \sqrt{2gH_*}, \quad (3.27)$$

где величину H_* , м , определяют согласно рис. 26.

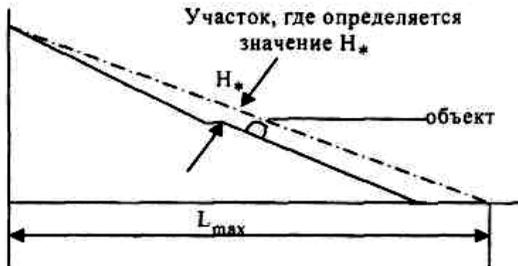


Рис. 26. Схема выброса лавины

На рис. 26 величина L_{max} – максимальная дальность выброса лавины.

Динамическое давление P_d , Па, на поверхность преграды, расположенную перпендикулярно направлению движения лавины, определяют по соотношению

$$P_d = k \cdot \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (3.28)$$

где принимают коэффициент $k = 1 \div 2$ [11, 14].

Гидростатическое давление снега на стенку существенно меньше динамического; в расчетах оценочного характера его допускается не рассматривать.

Умножая давление P_d на величину нагружаемой площади S поверхности объекта, можно оценить силу, действующую на эту поверхность в момент удара лавины ($F = P_d \cdot S$).

Если поверхность преграды образует угол β с направлением движения лавины, динамическое давление составляет

$$P'_d = P_d \sin^2 \beta. \quad (3.29)$$

Пример. Определить динамическое давление сухой лавины на вертикальную стенку, расположенную нормально направлению её движения, если плотность лавинного снега 300 кг/м^3 , скорость лавины 40 м/с (при значении коэффициента $k = 1$).

Решение. Искомое давление находим по формуле (3.28)

$$P_d = 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 40^2 = 240000 \text{ Па} = 0,24 \text{ МПа}.$$

3.7. Защитные мероприятия против оползней, обвалов, снежных лавин

Борьба с оползнями, обвалами основана на обеспечении устойчивости склонов. Для повышения их устойчивости проводятся следующие мероприятия.

Отвод поверхностных вод с поверхности оползневого участка с помощью системы водоотводных канав, лотков и ограждающих валов.

Отвод грунтовых вод путём дренирования склона. По конструкции дренажи бывают четырёх типов: горизонтальные трубчатые, дренажные галереи, вертикальные и комбинированные, представляющие собой

сочетание горизонтальных и вертикальных дренажей, объединённых в одну систему.

Разгрузка оползневых склонов путём перераспределения земляных масс (планировка, террасирование склона).

Поддержка земляных масс в равновесии с помощью возведения подпорных стенок, контрфорсов, контрбанкетов. Контрфорсы – подпорные сооружения, удерживающие, как и подпорные стенки, грунт склонов и откосов от смещения и врезающиеся подошвой в устойчивые слои грунта. Контрбанкеты устраиваются у подошвы потенциального оползня и своей массой препятствуют смещению оползневого грунта. Обычно они отсыпаются из местного грунта в виде упорной призмы.

Посадка древесной и кустарниковой растительности в комплексе с посевом многолетних дернообразующих трав на поверхности оползневого склона.

Спрямление русел рек и периодически действующих водотоков, подмывающих основание оползневых склонов.

Для укрепления берегов рек, водохранилищ и морских берегов, подвергающихся оползневому процессам, применяют откосные покрытия из железобетонных плит.

Для повышения устойчивости скальных склонов применяют анкерование.

Скатывающиеся камни улавливают с помощью заграждений в виде стенок и специальных сетей.

В районах, где возможны снежные лавины, также применяется система защитных сооружений. К их числу следует отнести следующие мероприятия.

При угрозе схода лавин устанавливается запрет на посещение людьми этого района. Ожидаемую лавину целесообразно предупредить (спровоцировать) в определённое время артиллерийским обстрелом. Иногда стабилизируют неустойчивый снежный покров, воздействуя химическими веществами и меняя тем самым свойства снега.

Принимаются меры к отклонению движения лавины, не допуская её на защищаемый участок. Наиболее удачными защитными конструкциями являются направляющие стенки, контрфорсы, валы, расположенные непосредственно перед угрожаемым участком.

В угрожаемых местах здания и сооружения должны строиться так, чтобы они могли выдержать динамическое давление лавины.

Глава 4. ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ

4.1. Механизм вулканических извержений

Вулкан (от лат. *vulcanus* – огонь, пламя) – геологическое образование в виде конуса из изверженных и остывших пород, возникающее над каналами и трещинами в земной коре, по которым на земную поверхность и в атмосферу извергаются лава, горячие газы, пары воды, пепел, обломки горных пород. Различают вулканы действующие, уснувшие и потухшие, а по форме – центрального и линейного типов.

Извержение вулкана может продолжаться несколько дней, иногда месяцев и даже лет. После извержения вулкан успокаивается на несколько лет и даже десятилетий. Такие вулканы называют действующими. Если промежуток между извержениями значительно больше, то его называют уснувшим. К потухшим относятся вулканы, которые извергались в давно прошедшие времена; об их деятельности не сохранилось никаких сведений.

По внешнему виду вулканы подразделяют на центрального типа и линейные. У вулкана центрального типа роль выводного канала для магмы выполняет жерло – вертикальный туннель (своеобразная труба), ведущий от подземного магматического очага к поверхности; у линейного вулкана магма поднимается к поверхности по трещинам. Схема вулкана центрального типа показана на рис. 27.

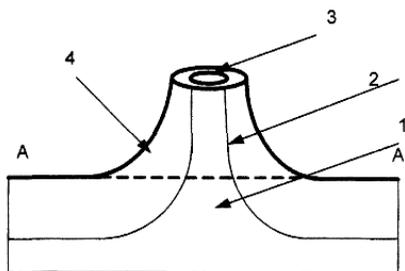


Рис. 27. Схема вулкана центрального типа:

AA' – поверхность земли, 1 – магматический очаг, 2 – жерло вулкана, 3 – кратер вулкана, 4 – конус вулкана

Примером вулканов линейного типа являются подводные вулканы океанических рифтовых хребтов.

Понятие вулканической деятельности охватывает явления, связанные с подъемом нагретых субстанций из глубин Земли на

поверхность, то есть газов, горячей воды, лавы. Лавой называется поднимающаяся по жерлу вулкана и изливающаяся из его кратера магма. Она представляет собой жидкую или очень вязкую преимущественно силикатную массу, нагретую до температуры $\sim 1200^\circ$.

На Земле насчитывается 552 действующих вулкана [1]. В нашей стране действующие вулканы находятся на Камчатке и Курильских островах. В связи с отдаленностью от основных густо населенных районов страны их деятельность менее сказывается на основной массе населения, чем, например, землетрясения. Но извержения вулканов были и есть проявление могущественных сил природы.

Вулканы, как правило, тяготеют к границам тектонических плит, см. п. 1.1. Вулканическое извержение является сложным процессом. Приближенно качественную картину извержения можно представить следующим образом. Как указывалось в этом параграфе, вещество астеносферы находится под большим давлением, обусловленным весом земной коры. При определенных условиях вещество астеносферы может перейти в жидкое (расплавленное) состояние, называемое магмой. В магме содержатся растворенные под давлением различные газы: углекислый газ CO_2 , хлористый и фтористый водород HCl и HF , оксиды серы SO_2 , SO_3 , метан CN_4 , азот N_2 и другие газы и пары воды. При понижении давления, что связано со сложными процессами, происходящими в зонах тектонической активности, сразу же нарушается состояние равновесия – газы, растворенные в магме, переходят в газообразное состояние, что сопровождается значительным увеличением их объема. Магма вскипает и вместе с выделяющимися из нее газами начинает подниматься вверх по жерлу вулкана или трещинам – происходит извержение вулкана.

Рассмотрим несколько примеров вулканических извержений [12]. Известна легенда о гибели Атлантиды. Согласно одной из гипотез, обсуждаемых в средствах массовой информации, Атлантида находилась не в Атлантическом океане, как считалось ранее, а в Средиземном море, точнее в Эгейском море. Ее центром являлась группа островов, примыкающих к острову Крит с северной стороны. Атлантида была процветающим государством с необычайно высокой для того времени культурой. И такая удивительная цивилизация внезапно погибла... Основным событием, приведшим к катастрофе, было извержение вулкана Санторин, происшедшее примерно 3,5 тысяч лет назад и сопровождавшееся взрывом и быстрым опусканием в морскую пучину значительных участков суши. При этом произошло сильное землетрясение, возникли гигантские морские волны цунами, выпал

обильный вулканический пепел. Атлантида частично провалилась, частично была смыта гигантскими волнами, частично засыпана толстым слоем пепла. Гипотеза, несомненно, нуждается в тщательной проверке и научном обосновании.

Широко известными примерами являются извержения вулканов Везувия в I веке н.э. (извержения этого вулкана происходили и позднее, например, в 1872 г.), Томборо в 1815 г., Кракатау в 1883 г.

Везувий расположен на берегу Неаполитанского залива в Италии. В результате извержения в 1979 г. погибли древнеримские города Помпея, Геркулантум, Стабия. На Помпеи и Стабию вулкан обрушил тучи пепла и град камней, одновременно на оба города опустилось облако ядовитых газов. Геркулантум был затоплен потоками горячей грязи, образовавшейся из лавы, воды и пепла.

Извержение вулканов Томборо, Кракатау описано в п. 1.1.

4.2. Выброс ядовитых газов в атмосферу, пеплопад, движение лавового потока

Вулканические извержения сопровождаются различными явлениями.

Прежде всего, при извержениях вулканов происходят землетрясения различной интенсивности. Воздействие землетрясений на различные объекты рассматривалось ранее в гл. 1.

Большую опасность представляет выброс ядовитых газов в атмосферу. Так при извержении вулкана Везувия на города Помпеи и Стабию обрушилось облако ядовитых газов. Многие жители погибли от токсического действия этих газов.

Материалы извержения, выброшенные в атмосферу и состоящие из смеси мелких и мельчайших обломков и частиц пород, в дальнейшем переносятся и распространяются следующими двумя способами - в виде пеплопада и пеплового потока.

Мельчайшие частицы и мелкообломочные продукты извержения, выброшенные вместе с горячими газами высоко в воздух, переносятся в атмосфере под действием турбулентности и ветра на большие расстояния. При этом возможно образование «огненных облаков». По мере затухания турбулентности несущая способность воздуха уменьшается, и под действием силы тяжести частицы осаждаются на земную поверхность в виде пеплопада. Мощность осадка пепла (толщина пеплового слоя) достигает часто нескольких метров, в отдельных случаях – десятков метров и более. Так при уже

упоминавшемся извержении вулкана Везувия три города Помпеи, Геркулантум, Стабия, – были погребены под толстым слоем вулканического пепла. И только через 17 столетий, когда о существовании этих городов было забыто, случайно при рытье колодца были обнаружены античные статуи, а затем в результате археологических раскопок был открыт погребенный город Помпеи и несколько позднее два других.

При пепловом потоке аккумуляция материала потока происходит из горячей, раскаленной смеси мелких и мельчайших обломков и газа, захваченных в быстрое турбулентное движение и смещающихся вниз по склону вулкана. Движение пеплового потока происходит под действием силы тяжести. Пепловый поток в форме раскаленного облака наблюдался, например, при извержении вулкана Мон-Пеле на острове Мартиника в Атлантическом океане в 1902 г.

Характерным признаком извержения является истечение лавы из кратера и движение ее по склону вулкана. При этом может сформироваться мощный поток (настоящая река из огненной лавы), который уничтожает все на своем пути, пока не затвердеет при остывании. Длина лавовых потоков может достигать десятков километров. Мощность (толщина) потоков – до нескольких десятков метров, скорость продвижения - несколько километров в сутки.

При извержении лавы с повышенной вязкостью в жерле вулкана могут образоваться пробки, в результате чего давление газов сильно возрастает, как следствие – происходят взрывы. Мощные взрывы способны произвести большие разрушения. При взрывах, как правило, выбрасываются вулканические бомбы. Они представляют собой крупные комки лавы. К ним относятся также выброшенные при извержении крупные камни диаметром обычно от 0,5 м до 5...7 м [11]. Дальность полета бомб составляет несколько километров, иногда – до десятков километров. Например, при извержении вулкана Безымянный на Камчатке вулканические бомбы летели на расстояние до 25 км.

Наконец, извержение связано не только с отложением материала на земной поверхности, но и с извлечением из глубин значительного объема магмы. Возникшая при этом полость может обрушиться, образуя кальдеру (от испанского *caldera* – большой котел) – глубокую котлообразную впадину вследствие провала вершины вулкана, а иногда и прилегающей к нему местности. Диаметр кальдеры достигает 10...15 километров и более. Такое обрушение приводит к особо тяжелым последствиям.

Таким образом, вулканическое извержение представляет собой природную катастрофу, которая может повлечь за собой большие разрушения и человеческие жертвы. При извержении имеет место комбинированный очаг поражения в результате действия целого ряда поражающих факторов.

4.3. Оценка дальности полета вулканических бомб

Опасность вулканических бомб заключается в том, что, обладая сравнительно большой массой, они движутся с большими скоростями, их падение на земную поверхность происходит, как правило, внезапно, неожиданно.

Для получения представления о характере движения таких бомб рассмотрим простейший случай движения тела, брошенного с некоторой начальной скоростью V_0 под углом β к горизонту, без учета сопротивления воздуха. Так как значительная часть полета бомбы проходит на большой высоте с пониженным значением плотности воздуха, такое допущение представляется оправданным. Схема движения бомбы показана на рис. 28.

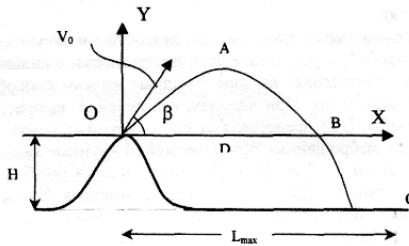


Рис. 28. Схема движения вулканической бомбы

На этом рисунке центр (точка «0») системы координат x, y совмещен с кратером вулкана, H – высота кратера, L_{\max} – дальность полета бомбы.

Система уравнений движения вулканической бомбы и начальные условия ее полета могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 0 & x|_{t=0} &= 0 & \dot{x}|_{t=0} &= V_0 \cos \beta \\ \ddot{y} &= -g & y|_{t=0} &= 0 & \dot{y}|_{t=0} &= V_0 \sin \beta \end{aligned} \quad (4.1)$$

При интегрировании уравнений движения находим

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V_0 \cos \beta, \\ \dot{y} &= V_0 \sin \beta - gt, \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} x &= V_0 \cos \beta \cdot t, \\ y &= V_0 \sin \beta \cdot t - \frac{gt^2}{2}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Исключив время t из решения (4.3), получаем

$$y = xtg - \frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \beta} x^2. \quad (4.4)$$

Это уравнение параболы OABC, по которой движется тело; ее ось DA вертикальна.

Скорость V во время полета составляет

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{V_0^2 \cos^2 \beta + (V_0 \sin \beta - gt)^2} = \\ &= \sqrt{V_0^2 - 2g \left(V_0 t \sin \beta - \frac{1}{2} gt^2 \right)} = \sqrt{V_0^2 - 2gy}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Из соотношения (4.5) следует, что, находясь на подъеме OA и при спуске AB на одинаковой высоте y , тело обладает и одинаковой скоростью V .

Момент T_1 достижения точки A (вершина параболы) находится при $y = 0$. Тогда из второго соотношения (4.2) следует

$$T_1 = \frac{V_0 \sin \beta}{g}.$$

Представляя T_1 вместо t в соотношении (4.3), находим высоту подъема $h = DA$ и абсциссу $l = OD$ точки D:

$$l = \frac{V_0^2 \sin 2\beta}{2g}; h = \frac{V_0^2 \sin^2 \beta}{2g}. \quad (4.6)$$

Отсюда

$$\text{при } \beta = 90^0, h = \frac{V_0^2}{2g}; \text{ при } \beta = 45^0, h = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_0^2}{2g}. \quad (4.7)$$

Момент времени T_2 , когда тело опустится в точку В, определится из условия

$$y = V_0 T_2 \sin \beta - \frac{1}{2} g T_2^2 = 0.$$

Отсюда

$$T_2 = \frac{2V_0 \sin \beta}{g} = 2T_1.$$

Из соотношения (4.5) следует, что в точке В скорость тела равна V_0 , так как в этой точке $y = 0$. Абсциссу $L = OB$ можно вычислить, если подставить T_2 вместо t в первое соотношение (4.3):

$$L = \frac{V_0^2 \sin 2\beta}{g} = 2l. \quad (4.8)$$

Максимальная величина L_* получается при $\sin 2\beta = 1$, то есть $\beta = 45^\circ$. Она составляет

$$L_* = \frac{V_0^2}{g}. \quad (4.9)$$

Соотношение (4.9) часто используют для оценки дальности полета вулканических бомб в приближенных расчетах, не требующих особой точности.

Более строго дальность полета можно определить, если учесть начальную высоту точки выброса бомбы, то есть высоту кратера вулкана. Подставив значение высоты $y = -H$ в соотношение (4.4), получаем

$$\frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \beta} x^2 - tg\beta \cdot x - H = 0. \quad (4.10)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$x = L_M = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (4.11)$$

где $a = \frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \beta}$; $b = -\text{tg}\beta$; $c = -H$.

Пример. Оценить дальность полета вулканической бомбы, если начальная скорость составляет 300 м/с, угол выброса по отношению к горизонту 45° , высота кратера вулкана 1000 м.

Решение: 1. Находим численные коэффициенты уравнения (4.11):

$$a = \frac{9,81}{2 \cdot 300^2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2} = 1,09 \cdot 10^{-4}, \quad b = -\text{tg}45^\circ = -1, \quad c = -1000.$$

2. По соотношению (4.11) вычисляем дальность полета бомбы:

$$L_M = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4 \cdot 1,09 \cdot 10^{-4} \cdot (-1000)}}{2 \cdot 1,09 \cdot 10^{-4}} \approx 10^4 \text{ м.}$$

Для сравнения дальность полета бомбы, рассчитанная по соотношению (4.9), составляет $9,2 \cdot 10^3$ м.

4.4. Энергия вулканических извержений

Энергию вулканического извержения оценивают, исходя из анализа процессов, имеющих место при извержении. Выделяемая энергия включает в себя: энергию вулканического землетрясения; энергию, расходуемую на разрушение горных пород; тепловую энергию в форме тепла, содержащегося в извергнутой лаве и газах. Определяющим видом энергии является тепловая энергия. Последняя оценивается массой извергнутого материала и его температурой [14]:

$$E = V\rho(\Delta T \cdot c_1 + c_2), \quad (4.12)$$

где E – высвобождаемая тепловая энергия, кал (1 кал = 4,19 Дж); V – объем извергнутого материала, м³; ρ – его средняя плотность, кг/м³; ΔT – превышение температуры лавы над температурой воздуха, °С; c_1 – удельная теплоемкость лавы (0,25 ккал/кг·град.°); c_2 – теплота плавления ($c_2 = 50$ ккал/кг для расплавленной лавы и $c_2 = 0$ для твердого материала).

Пример. Оценить энергию вулканического извержения, если объем извергнутого материала (лавы) составляет 1 км³, температура лавы 1200°, плотность $2,5 \cdot 10^3$ кг/м³, температура воздуха 0°.

Решение: 1. Энергию вулканического извержения рассчитываем по формуле (4.12)

$$\begin{aligned} E &= 10^9 \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot (1200 \cdot 0,25 \cdot 10^3 + 50 \cdot 10^3) = \\ &= 0,875 \cdot 10^{18} \text{ кал} = 3,67 \cdot 10^{18} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Как отмечалось в п. 1.1, при извержении вулкана Кракатау в атмосферу было выброшено ~19 км³ магматического материала. Энергия такого извержения могла составлять $E = 19 \cdot 3,67 \cdot 10^{18} = 0,7 \cdot 10^{20}$ Дж.

4.5. Прогноз вулканических извержений. Меры безопасности

Существует большая потребность в прогнозе времени и последствий предполагаемых извержений с тем, чтобы иметь возможность своевременно оповестить местное население. Прогнозирование вулканических извержений в значительной мере основано на наблюдениях за известными вулканами. Анализ повторяемости извержений некоторых вулканов показывает, что она может быть описана Пуассоновским распределением.

Тогда вероятность N извержений за период времени T по аналогии с (2.22) может быть представлена в виде

$$P(N, T) = \frac{(\mu T)^N}{N!} \cdot \exp(-\mu T), \quad (4.13)$$

где μ – плотность извержений (среднее число извержений в единицу времени).

Риск вулканического извержения оценивается по соотношению аналогичному (2.40):

$$R = 1 - \exp(-\mu T). \quad (4.14)$$

Зависимости (4.13), (4.14) лежат в основе долгосрочного прогноза.

Для оперативного краткосрочного прогноза выявлены явления, могущие играть роль предвестников. К их числу относятся: усиление термальной деятельности, изменение химического состава выделяющихся газов, увеличение частоты подземных толчков, аномальные изменения магнитного и электрического полей, аномальное поведение животных. В результате удалось предсказать ряд извержений. Тем не менее, как и в случае землетрясений, было бы неправильно считать, что вопрос предсказания извержений вулканов полностью решен. Исследования в этом направлении продолжаются.

Вулканические извержения – грозные природные явления. Поэтому необходимо предусмотреть и обеспечить комплекс мероприятий, позволяющих уменьшить негативные последствия этих явлений. К их числу относятся:

- разработка карт активной вулканической деятельности, зонирование территории по степени опасности;
- разработка методов оперативного прогнозирования вулканических извержений;
- обучение населения поведения при угрозе извержений;
- разработка мероприятий по срочной эвакуации населения из опасных районов.

К инженерным мероприятиям, уменьшающим ущерб от извержения вулкана, относят строительство защитных дамб, насыпей, позволяющих изменить направление лавового потока.

Глава 5. НАВОДНЕНИЯ

5.1. Классификация наводнений

Вода играет огромное значение для жизни на Земле. Ее нельзя ничем заменить. Она нужна всем и всегда. Но вода может быть и причиной больших бед. Из них особое место занимают наводнения. По данным ООН за последние 10 лет во всем мире от наводнений пострадало 150 млн. человек. Статистика свидетельствует: по площади распространения, суммарному среднему годовому ущербу и повторяемости в масштабах нашей страны наводнения занимают первое место в ряду других стихийных бедствий. Что же касается человеческих жертв и удельного материального ущерба, то есть ущерба, приходящегося на единицу пораженной площади, то в этом отношении наводнения занимают второе место после землетрясений [33].

Наводнение – это значительное затопление местности, вызванное подъемом уровня воды в реке, озере, прибрежном районе моря. По причинам, вызывающим подъем уровня воды, различают следующие виды наводнений: половодье, паводок, подпорное, наводнение прорыва, нагонное, при действии подводного источника большой энергии.

Половодье и паводок связаны с прохождением большого для конкретной реки расхода воды.

Половодьем называют ежегодно повторяющееся в один и тот же сезон относительно длительное существенное увеличение водоносности реки. Причина половодья – возрастающий приток воды в речное русло, вызванный весенним таянием снега на равнинах, таянием снега и ледников в горах летом, продолжительными муссоновыми дождями. Уровень воды на малых и средних равнинных реках во время весеннего половодья поднимается на 2...5 метров, на крупных, например на сибирских – на 10...20 метров. При этом реки могут разливаться в ширину до 10...30 км и более. Наибольший из известных подъемов уровня воды до 60 метров наблюдался в 1876 г. в Китае на реке Янцзы в районе Игана [34]. На малых равнинных реках весеннее половодье длится 15...20 дней, на крупных – до 2...3 месяцев.

Паводок – это сравнительно кратковременный (1...2 суток) подъем воды в реке, вызванный обильными ливневыми дождями или бурным таянием снежного покрова. Паводки могут повторяться по несколько раз в году. Иногда они проходят один за другим, волнами, в зависимости от количества сильных ливневых дождей.

Подпорное наводнение возникает в результате увеличения сопротивления стоку воды при заторах и зажорах льда в начале или

конце зимы, при заторах на лесосплавных реках, при частичном или полном перекрытии Русла вследствие обвалов при землетрясениях, оползнях.

Нагонные наводнения создаются ветровыми нагонами воды в заливах и бухтах на морском побережье и берегах крупных озер. Могут возникать в устьях крупных рек вследствие подпора стока нагонной ветровой волной. В нашей стране нагонные наводнения наблюдаются на Каспийском и Азовском морях, а также в устьях рек Невы, Западной Двины и Северной Двины. Так в городе Санкт-Петербурге такие наводнения происходят почти ежегодно, особо крупные были в 1824 г. и в 1924 г.

Наводнение прорыва относится к числу наиболее опасных. Оно возникает при разрушении или повреждении гидротехнических сооружений (плотин, дамб) и образовании волны прорыва. Разрушение или повреждение сооружения возможны из-за некачественного строительства, в результате неправильной эксплуатации, при применении взрывных видов оружия, а также при землетрясении.

Наводнения, вызываемые действием мощных импульсных источников в водных бассейнах, также представляют серьезную опасность. Природными источниками являются подводные землетрясения и извержения вулканов, в результате этих явлений в море образуются волны цунами; техническими источниками – подводные ядерные взрывы, при которых формируются поверхностные гравитационные волны. При выходе на берег эти волны не только затопливают местность, но и трансформируются в мощный гидропоток, выбрасывающий на берег суда, разрушающий здания, мосты, дороги. Например, при нашествии в 1896 г. цунами на северо-восточное побережье о. Хонсю (Япония) было смыто свыше 10 тыс. строений, погибло около 26 тыс. человек [35].

Ниже рассматриваются основные параметры половодья, паводка, наводнений прорыва, нагонного и цунами, даются рекомендации по оценке последствий и защите от наводнений.

5.2. Половодье

Одной из основных характеристик течения рек является расход-объем воды, проходящий через поперечное сечение русла в единицу времени. Изменение расхода во времени в период половодья (гидрограф) представлено на рис. 29 (Q_0 – бытовой расход, Q_m – максимальный расход)

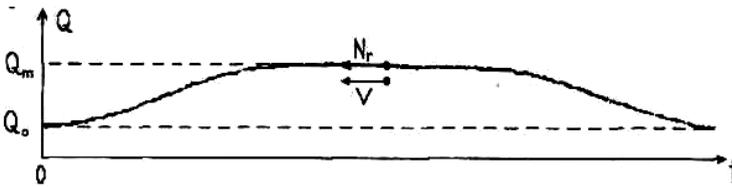


Рис. 29. Гидрограф половодья

При половодье имеет место плавное, относительно медленное изменение параметров потока (квазистационарное течение). На рис. 29 величина N_r – это скорость распространения расхода Q_m по руслу реки, величина V – скорость течения воды при прохождении расхода Q_m ; при половодье $N_r \approx v$.

Для определения параметров водного потока в речных руслах используются уравнения Сен-Венана[33]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial h}{\partial x} = -B\lambda \frac{Q|Q|}{S^2}, \quad (5.1)$$

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t),$$

где $Q = VS$ – расход воды; V – средняя скорость потока в рассматриваемом поперечном сечении; S – площадь этого сечения; B – ширина свободной поверхности водного потока; λ – коэффициент сопротивления русла; $q(x, t)$ – боковой сток и приток воды (таяние снега, грунтовые воды, притоки).

Для пояснения обозначений на рис. 30 приведена схема русла реки. На рисунке ось x расположена горизонтально вдоль русла и в направлении течения реки.

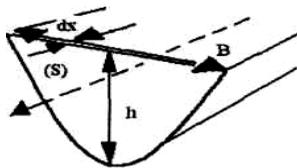


Рис. 30. Схема русла реки

Проанализируем вначале первое уравнение системы (5.1). Это уравнение движения. Первые два члена в уравнении выражают инерцию

элементарного объема жидкости, третий член – разность давлений на основаниях этого объема (сила горизонтального градиента давления или, что-то же самое, составляющая силы тяжести по оси движения потока, проинтегрированная по площади S). В правой части уравнения стоит выражение для интегральной силы сопротивления.

Второе уравнение системы – уравнение неразрывности. Здесь первый член – скорость изменения площади сечения, второй – горизонтальная неравномерность потока. Член в правой части уравнения определен выше.

Для получения представления о параметрах движения потока при половодье рассмотрим случай $q(x, t) = 0$. Он может наблюдаться, например, в разгар половодья, когда дополнительное поступление воды за счет таяния снега практически прекращается, а также при отсутствии боковых речных притоков.

Как отмечалось, при половодье имеет место относительно медленное изменение параметров потока (квазистационарное течение). Следовательно, производными по времени в уравнениях (5.1) можно пренебречь.

При $B \frac{\partial h}{\partial t} = 0$, $q(x, t) = 0$ уравнение неразрывности приводится к виду

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0. \quad (5.2)$$

Его решение имеет вид

$$Q = \text{const}. \quad (5.3)$$

Решение (5.3) позволяет приближенно рассматривать квазистационарное течение при половодье как установившееся.

Установлено также, что при квазистационарном течении жидкости второй член в уравнении движения играет меньшую роль, чем третий. С учетом данного обстоятельства уравнение движения может быть упрощено дополнительно:

$$qS \frac{\partial h}{\partial t} = -B\lambda \frac{Q|Q|}{S^2}. \quad (5.4)$$

Проанализируем это уравнение. Так как $\frac{Q}{S} = V$, $\frac{\partial h}{\partial x} = -i$, где i – уклон, и принимая для широких русел $S \approx hB$, можно получить

$$gi = \lambda \frac{V^2}{h}. \quad (5.5)$$

В гидравлике коэффициент сопротивления русла $\lambda = gC^{-2}$, где C – коэффициент Шези; в свою очередь $C = n^{-1}h^{1/6}$, где n – коэффициент шероховатости русла [36]. Подставляя данные соотношения в уравнение (5.5), находим

$$V = \frac{1}{n} h^{2/3} i^{1/2}. \quad (5.6)$$

Выражение (5.6) – аналог формулы Шези [36]:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2}, \quad (5.7)$$

где $R = \frac{S}{\Psi}$ – гидравлический радиус; Ψ – смоченный периметр.

Для прямоугольного русла шириной b при глубине потока h величины S , V , R имеют значения $S = hb$, $\Psi = b + 2h$, $R = bh/(b + 2h)$. Следовательно, для широкого прямоугольного русла при $b \gg h$ величина $R \approx h$. Приблизительно соотношение $R \approx h$ принимают и для других широких русел, когда $b > h$. С учетом сделанных пояснений расход при половодье может быть представлен в виде

$$Q = V \cdot S = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2} \cdot S \approx \frac{1}{n} \cdot h^{2/3} \cdot i^{1/2} \cdot S. \quad (5.8)$$

Средние уклоны дна:

$$i = \left(5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-4} \right) - \text{для равнинных рек;}$$

$$i = \left(5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-3} \right) - \text{для предгорных рек;}$$

$i > 5 \cdot 10^{-3}$ – для горных рек.

Значения коэффициента шероховатости приведены в табл. 20.

Таблица 20

Значения коэффициента шероховатости для естественных русел

№	Характеристика русла	n
1	Русла в весьма благоприятных условиях (чистые, прямые в плане)	0,025
2	Русла больших и средних рек равнинного типа в благоприятных условиях состояния ложа	0,033
3	Сравнительно чистые русла равнинных водотоков в обычных условиях (извилистые с некоторыми неправильностями в направлениях струй или же прямые, но с неправильностями в рельефе дна)	0,040
4	Русла больших и средних рек, значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые, с непокойным течением	0,050
5	Порожистые участки равнинных рек. Значительно заросшие, неровные, плохо разработанные поймы (промоины, кустарники, деревья) с наличием заводей.	0,067
6	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода)	0,133

Принято естественные русла аппроксимировать зависимостью вида [37]

$$S = A \cdot h^m, \quad (5.9)$$

где S – площадь поперечного сечения русла; h – высота от дна русла; A , m – параметры параболы. Такие русла называются обобщенными параболическими.

Ширина русла находится по отношению

$$b = m \cdot A \cdot h^{m-1}. \quad (5.10)$$

Параметры A , m имеют значения

$$A = \frac{S}{h^m}, \quad m = \frac{bh}{S}. \quad (5.11)$$

Параметры A , m для реальных русел определяют следующим образом. По данным топографических карт в заданном створе строят поперечное сечение русла до заданной высоты h . По результатам

построения находят значение S . Используя соотношения (5.11), вычисляют величины A и m . Рекомендуется параметры A и m находить как средние значения по результатам аналогичных построений в нескольких створах.

В частных случаях прямоугольного, треугольного и трапецидального русла значения A и m могут быть представлены в виде:

$$A = \frac{S_0}{h_0^m} \quad \text{— для всех перечисленных русел;}$$

$$m = \frac{b_0 h_0}{b_0 h_0} = 1 \quad \text{— для прямоугольного русла;} \quad (5.12)$$

$$m = b_0 h_0 / \frac{1}{2} b_0 h_0 = 2 \quad \text{— для треугольного русла;}$$

$$m = b_0 h_0 / \frac{1}{2} (b_0 + b_*) h_0 = 2 \cdot b_0 / (b_0 + b_*) \quad \text{— для трапецидального русла.}$$

В этих соотношениях S_0 — площадь поперечного сечения бытового потока; величины b_0 , b_* , h_0 , связанные с параметрами русла и бытового потока, показаны на рис. 31.

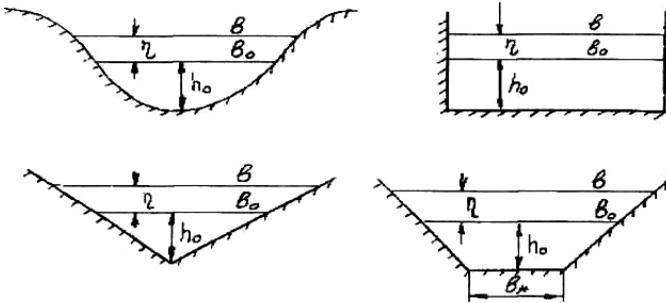


Рис. 31. Формы русел: а — параболическое, б — прямоугольное, в — треугольное, г — трапецидальное

Согласно соотношениям (5.6), (5.7) скорость бытового потока составляет

$$V_0 = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} = \frac{1}{n} h_0^{2/3} i^{1/2}. \quad (5.13)$$

Тогда скорость потока при половодье можно представить в виде

$$V_0 = \frac{1}{n} P^{2/3} i^{1/2} = V_0 \cdot \left(\frac{h_0 + \eta}{h_0} \right)^{2/3}. \quad (5.14)$$

Максимальный расход при половодье

$$\begin{aligned} Q_m &= S \cdot V = A \cdot (h_0 + \eta)^m \cdot V_0 \cdot \left(\frac{h_0 + \eta}{h_0} \right)^{2/3} = \\ &= Ah_0^m V_0 \left(\frac{h_0 + \eta}{h_0} \right)^{m+2/3} = Q_0 \cdot \left(\frac{h_0 + \eta}{h_0} \right)^{m+2/3}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Максимальный подъём уровня воды

$$\eta = h_0 \left[\left(\frac{Q_m}{Q_0} \right)^{\frac{3}{3m+2}} - 1 \right]. \quad (5.16)$$

Величина Q_m , определяющая значение η , зависит от ряда факторов: запасов снежной массы в бассейне реки, температуры воздуха, выпадения осадков, ускоряющих сход снежного покрова. Учёт этих факторов (вместе с данными многолетних наблюдений) непосредственно влияет на достоверность прогноза о масштабах затопления при половодье.

Размеры зоны затопления определяются по отметкам на топографической карте, соответствующим высоте подъема уровня воды η .

Для предварительных оценок могут быть использованы данные табл. 21 и 22 [14].

Таблица 21

Максимальные расходы воды в периоды половодья рек

Площадь водосбора, км ²	500	1000	10000
Расход Q_m , м ³ /с	100...400	400...1500	1500...4500

**Возможные размеры зон затопления в зависимости от уровня
подъема воды**

Высота подъема воды η , м	1,5...2	2...4	4...6	6..14
Зона затопления, км ²	10	10...100	100...1000	1000

5.3. Паводок

Опасность паводкового наводнения состоит в том, что оно может быть неожиданным, например, при прохождении ливневых дождей в ночное время. При паводке имеет место сравнительно кратковременный подъем воды, вызываемый ливневыми дождями или бурным таянием снега. На рис. 32 приведен гидрограф расхода ливневого паводка. Он состоит из восходящего участка, начинающегося в точке А, гребня В и затем нисходящего участка, оканчивающегося в точке С; точку А называют фронтом паводковой волны.

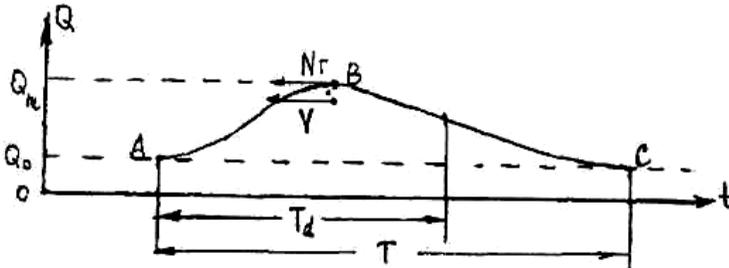


Рис. 32. Гидрограф ливневого паводка

На этом рисунке T_d – продолжительность выпадения осадков, T – продолжительность паводка, Q_m – максимальный расход, Q_0 – бытовой расход.

Паводок относится к нестационарным течениям. При определении параметров водного потока при паводке пользуются системой уравнений Сен-Венана (5.1) (без упрощающих допущений, принимаемых для описания течения жидкости при половодье). Решение системы (5.1) выполняется численно с помощью ЭВМ.

Паводок – это волновое движение. Скорость фронта паводка вычисляется по формуле

$$N_{\Phi} = V_0 + \alpha \sqrt{q \cdot h_0}, \quad (5.17)$$

где V_0 , h_0 – скорость и глубина основного потока соответственно; α – коэффициент, зависящий от формы русла (для реальных русел приближенно принимают $\alpha \approx 0,8$).

Скорость гребня паводка

$$N_r = \frac{2}{3} \cdot V = \frac{2}{3} V_0 \left(\frac{h_0 + \eta}{h_0} \right)^{2/3}, \quad (5.18)$$

где η – подъем уровня воды при прохождении паводка.

Для определения величины η используется формула (5.16), где в данном случае максимальный расход находят по соотношению [34]

$$Q_m = \frac{k \cdot J \cdot F}{3,6} + Q_0, \quad (5.19)$$

где Q_m – максимальный расход, м³/с; Q_0 – расход до выпадения осадков, м³/с; J – интенсивность осадков, мм/час; F – площадь района выпадения осадков в бассейне реки, км²; k – коэффициент, учитывающий долю стока осадков в реку (обычно $0 < k < 1$; в приближенных расчетах для оценки максимально возможного паводка допускается принимать $k \approx 1$).

Высота паводка на расстоянии X от наблюдаемого створа оценивается по соотношению [37]

$$\eta = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 + X}}, \quad (5.20)$$

где C_1 , C_2 – константы, определяемые по наблюдениям высоты паводка в двух створах.

Пример. Определить максимальную высоту паводковой волны при выпадении ливневых осадков интенсивностью 40 мм/час на площади 162 км² в бассейне реки. Русло реки трапецеидальное, ширина русла по дну 100 м, по урезу воды 200 м, глубина реки 4 м, скорость бытового течения 1 м/с.

Решение: 1. Находим бытовой расход воды в реке:

$$Q_0 = S_0 \cdot V_0 = \frac{1}{2} \cdot (200 + 100) \cdot 4 \cdot 1 = 600 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. По формуле (3.19) вычисляем максимальный расход при прохождении паводка:

$$Q_m = \frac{1 \cdot 40 \cdot 162}{3,6} + 600 = 2400 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. По соотношению (5.12) определяем параметр m русла реки:

$$m = \frac{b_0 \cdot h_0}{S_0} = \frac{200 \cdot 4}{\frac{1}{2} \cdot (200 + 100) \cdot 4} = \frac{4}{3}.$$

4. По формуле (5.16) вычисляем максимальный подъем уровня воды при паводке:

$$\eta = 4 \cdot \left[\left(\frac{2400}{600} \right)^{\frac{3}{3 \cdot \frac{4}{3} + 2}} - 1 \right] = 4 \text{ м}.$$

5.4. Волна прорыва при разрушении плотин гидроузлов

При авариях, сопровождающихся разрушением плотины, запасенная потенциальная энергия водохранилища высвобождается в виде волны прорыва (типа мощного паводка), образующейся при изливе воды через проран (брешь) в теле плотины. Волна прорыва распространяется по речной долине на сотни километров и более.

Оценим величину запасенной энергии водохранилища на следующем примере. Пусть глубина воды у плотины в верхнем бьефе $H_0 = 55$ м, в нижнем бьефе $h_0 = 5$ м, длина плотины $B = 5000$ м, длина водохранилища $L = 40000$ м (рис. 33).

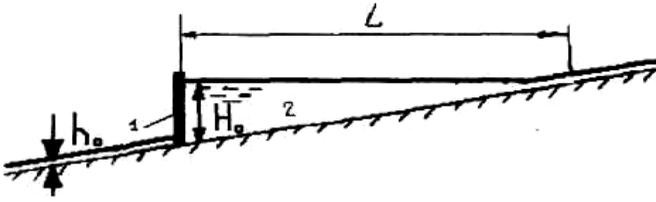


Рис. 33. Схема водохранилища: 1 – плотина, 2 – водохранилище

Потенциальная энергия водохранилища может быть найдена по соотношению

$$П = \frac{1}{3}(H_0 - h_0)^2 \cdot L \cdot B \cdot \rho \cdot g = \frac{1}{3}(55 - 5)^2 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,7 \cdot 10^{15} \text{ Дж.}$$

Здесь ρ – плотность воды, кг/м^3 , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Для сравнения: энергия ядерного взрыва мощностью $q = 10^6$ т (в тротиловом эквиваленте) составляет $4,52 \cdot 10^{15}$ Дж.

Основными параметрами волны прорыва являются: высота гребня η_{Γ} , наибольшая скорость течения V_m , время прихода фронта t_{Φ} , гребня t_{Γ} , хвоста t_{χ} . На рис. 34 показано продольное сечение волны прорыва.

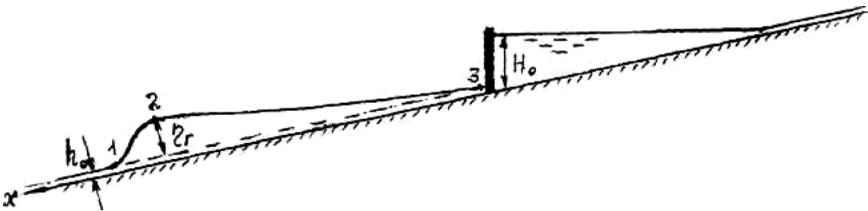


Рис 36. Волна прорыва: 1 – фронт волны, 2 – гребень, 3 – хвост, H_0 – глубина водохранилища, h_0 – уровень воды в реке, η_{Γ} – высота гребня волны

Для определения параметров волны прорыва решается полная система уравнений Сен-Венана (5.1) по машинным программам, разработанным в Сибирском отделении АН РФ и институте «Гидропроект» им. С. Я. Жука. Некоторые результаты полученного решения приведены, например, в [14, 37-40].

В качестве примера в табл. 23 приведены данные по величинам η_{Γ} , V_m , t_{Φ} , t_{Γ} при распространении волны прорыва по схематизированному

прямоугольному руслу для трех характерных гидроузлов равнинного и предгорного типов при ширине прорана $B_{пр} \approx 0,5 B$, где B – длина плотины. Это случай, близкий к полному разрушению плотины. Более полные данные по параметрам волны прорыва при различных значениях, $B_{пр}$, i изложены в литературе [37,38].

Таблица 23

Параметры волны прорыва

H_0 , м	i	X , км	η_{Γ}^0 , м	V_m^0 , м/с	t_{Φ}^0 , час	t_{Γ}^0 , час
20	10^{-4}	10	7,5	1,8	1,3	4,8
		50	7,0	1,2	12	24
		100	6,5	0,9	27	48
		250	5,5	0,55	84	120
40	10^{-4}	10	16,5	3,1	0,7	3,4
		50	14,8	1,8	6,4	18
		100	13,4	1,4	15	36
		250	11,5	0,9	45	83
100	10^{-3}	10	34	9,0	0,25	0,6
		50	29	6,6	1,7	3,4
		100	25	5,6	3,8	6,0
		250	20	4,5	11	15

В приближенных расчетах, носящих оценочный характер, влияние формы и коэффициента трения русла на величины η_{Γ} , V_m , t_{Φ} , t_{Γ} учитываются с помощью соотношений:

$$\eta_{\Gamma} = \eta_{\Gamma}^0 \cdot [1 + 0,3 \cdot (M - 1)],$$

$$V_m = V_m^0 \cdot \left(\frac{\eta_{\Gamma} + h_0}{\eta_{\Gamma}^0 + h_0} \right)^{2/3},$$

$$t_{\Phi} = \frac{0,067}{n} \cdot t_{\Phi}^0,$$

$$t_{\Gamma} = \frac{0,067}{n} \cdot t_{\Gamma}^0,$$
(5.21)

где η_{Γ} , V_m , t_{Φ} , t_{Γ} – высота гребня, максимальная скорость течения воды, время прихода фронта, время прихода гребня волны прорыва, распространяющейся по руслу произвольной формы; η_{Γ}^0 , V_m^0 , t_{Φ}^0 , t_{Γ}^0 –

аналогичные параметры волны прорыва, распространяющейся по схематизированному прямоугольному руслу (данные табл. 23).

В этих соотношениях M – параметр, учитывающий форму русла, определяемый по формулам (5.12); n – коэффициент трения русла (см. табл. 20).

Следует отметить, что строгий расчет параметров волны прорыва достаточно сложен. Например, для определения высоты гребня волны необходимо учитывать несколько коэффициентов, определяющих размеры прорыва, соотношения между напором воды на плотину H_0 и глубиной бытового потока h_0 , между уклонами дна в нижнем и верхнем бьефах (ниже и выше плотины), резкие сужения и расширения русла, повороты русла. При необходимости влияние отмеченных факторов может быть уточнено с помощью рекомендаций [37,38].

Распространение волны прорыва приводит к затоплению речной долины ниже плотины по течению реки. Необходимо отметить, что волна прорыва обладает мощным поражающим действием.

Критическими параметрами, определяющими поражающее действие волны прорыва, являются глубина потока η_{Γ} и скорость течения V_m (табл. 24). Допускается некоторое отклонение значений η_{Γ} , V_m от данных приведенных в этой таблице, при сохранении условия $\eta_{\Gamma} \cdot V_m^2 = \text{const}$.

Таблица 24

Поражающее действие волны прорыва

Сооружение	Степень поражения					
	Сильное разрушение		Среднее разрушение		Слабое разрушение	
	η_{Γ} , м	V_m , м/с	η_{Γ} , м	V_m , м/с	η_{Γ} , м	V_m , м/с
Промышленные здания с тяжёлым металлическим каркасом.	7-8	3-4	6	3	3	1,5
Промышленные здания с легким металлическим каркасом.	5-6	2,5-3	3,5	2	2-2,5	1,5
Кирпичные здания (4 этажа и более)	5-6	3	4	2,5	2,5	1,5
Кирпичные здания (1-3 этажа)	4	2,5	3	2	2	1
Деревянные дома (1-2 этажа)	3,5	2	2,5	1,5	1	1

В целом ряде случаев при оценке состояния зданий, сооружений в зоне затопления, необходимо знать ущерб, нанесенный этим сооружениям. Для оценки ущерба в приближенных расчетах используются данные табл. 11. Более строгие оценки могут быть

получены при сопоставлении величины ущерба с вероятностью поражения сооружения. Вероятность поражения в этом случае является математическим ожиданием ущерба.

Необходимо отметить, что в табл. 24 критерии безусловного поражения (полного разрушения) и безопасности зданий отсутствуют. В приближенных расчетах при отсутствии указанных данных за значение параметра определяющего нижнюю границу безусловного поражения сооружения, допустимо принять (с определенными оговорками) верхнее значение η_{Γ}, V_m^2 , при котором имеют место сильные разрушения. Одновременно за значение параметра, определяющего границу безопасности, допустимо принять нижнее значение η_{Γ}, V_m^2 , при котором имеют место слабые разрушения. Последующий расчет вероятности поражения сооружения проводится по формулам (2.15) – (2.19).

При получении дополнительных материалов исследований по критериям поражения различных сооружений волной прорыва результаты расчета по оценке вероятности поражения (и ущерба) могут быть уточнены.

Пример. Определить вероятность поражения волной прорыва промышленного здания с легким металлическим каркасом, расположенного на берегу реки в зоне затопления. Высота потока у здания 4 м, скорость течения 2,5 м/с.

Решение: 1. Так как критерии безусловного поражения и безопасности рассматриваемого здания в табл. 24 отсутствуют, примем за первый из них – верхнее значение η_{Γ}, V_m^2 , отвечающее сильным разрушениям здания, за второй – нижнее значение η_{Γ}, V_m^2 , при котором имеет место слабое разрушение.

Получаем

$$(\eta_{\Gamma} \cdot V_m^2)_{\max} = 6 \cdot 3^2 = 54 \text{ м} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2,$$

$$(\eta_{\Gamma} \cdot V_m^2)_{\min} = 2 \cdot 1,5^2 = 4,5 \text{ м} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2.$$

2. По формулам (2.19) вычисляем значения параметров нормального закона распределения:

$$M = \frac{54 + 4,5}{2} = 29,25 \text{ м} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2,$$

$$\sigma = \frac{54 - 4,5}{6} = 8,25 \text{ м} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2,$$

$$Z = \frac{4 \cdot 2,5^2 - 29,25}{8,25} = -0,515.$$

3. По третьему соотношению (2.17) вычисляем значение функции $\Phi(|Z|)$:

$$\Phi(|Z|) = 0,5 \cdot \left[1 - \exp(-0,37 \cdot |-0,515|^2) - 0,8 \cdot |-0,515|^2 \right] = 0,2.$$

4. Вероятность поражения здания находим по первому соотношению (2.17):

$$P = 0,5 - 0,2 = 0,3.$$

5.5. Нагонные наводнения

Нагонные наводнения, как правило, наблюдаются при прохождении мощных циклонов.

Диаметр циклона $d = 1000 - 2000$ км (рис. 35), высота $2 - 10$ км, давление в центре $950 - 960$ мбар (атмосферное давление на уровне моря 1012 мбар), скорость перемещения до $30 - 45$ км/час. Воздушные массы в циклоне движутся по спирали, закручивающейся к его центру против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном. Скорость ветра в циклоне может быть до 20 м/с, иногда до 30 м/с. Кинетическая энергия движущихся воздушных масс может достигать величины $4 \cdot 10^{17}$ Дж [11], что соответствует энергии взрыва примерно 100 ядерных зарядов мегатонного класса.

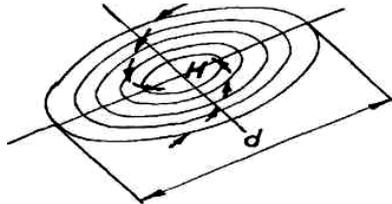


Рис. 35. Схема циклона:

H – центр циклона, круговые линии – изобары, стрелки – направление ветра, d – диаметр циклона

Разновидность циклона – тайфун. В переводе с китайского тайфун – очень сильный ветер, в Америке его называют ураганом. Он представляет собой атмосферный вихрь диаметром несколько сотен километров. Давление в центре тайфуна может достигать ~900 мбар. Сильное снижение давления в центре и относительно небольшие размеры приводят к образованию значительного градиента давления в радиальном направлении. Ветер в тайфуне достигает $30 \div 50$ м/с, иногда и более 50 м/с. Тангенциально дующие ветры обычно окружают спокойный участок, называемый глазом тайфуна. Он имеет диаметр $15 \div 25$ км, иногда до $\sim 50 \div 60$ км. По его границе образуется облачная стена, напоминающая стену вертикального кругового колодца. С тайфунами связаны особенно высокие нагонные наводнения [11,12].

При прохождении циклона по морю уровень воды в его центральной части повышается. Высота подъема, называемого барическим, составляет

$$\eta = \frac{P_0 - P}{\rho g}, \quad (5.22)$$

где P_0 – атмосферное давление на уровне мирового океана, Па; P – давление в центре цикла, Па; ρ – плотность воды, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения.

В качестве примера определим барический подъем воды, если давление в центре циклона $P = 950$ мбар ($0,95 \cdot 10^5$ Па), давление за пределами циклона $P = 1012$ мбар ($1,012 \cdot 10^5$ Па).

По формуле (5.22) вычисляем

$$\eta = \frac{1,012 \cdot 10^5 - 0,95 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 0,63 \text{ м.}$$

Как будто немного, но барический подъем уровня воды происходит на большой площади, измеряемой сотнями и тысячами квадратных километров. При смещении циклона этот подъем воды оседает, растекаясь во все стороны в виде так называемой длинной волны, длина которой в отдельных случаях достигает ~800 км. Будучи незаметной в открытом море, эта волна может стать опасной, когда центр циклона приближается к побережью и волна входит в заливы, бухты. При движении длинной волны по сужающимся заливам и бухтам

происходит повышение уровня воды, в несколько раз превышающее начальный барический подъем.

В заливах, бухтах аналогично, как в сосудах, жидкая среда имеет определенные величины периодов собственных колебаний. Обладающий большой энергией циклон и порожденная им длинная волна могут возбудить собственные колебания воды (сейши). При этом возможно наложение сейшевых колебаний на длинную волну, приводящее к увеличению (или уменьшению) подъёма уровня воды.

В частном случае прямоугольного в плане водоема длиной a , шириной b , глубиной H_0 период сейшевых колебаний определяется по формуле Мериана (при $a > b \gg H_0$) [35]:

$$T_n = \frac{2a}{n \cdot \sqrt{g \cdot H_0}},$$

или

(5.23)

$$T_n = \frac{2a}{\sqrt{g \cdot H_0}}; T_n = \frac{a}{\sqrt{g \cdot H_0}}; T_n = \frac{2a}{3 \cdot \sqrt{g \cdot H_0}},$$

где T_1, T_2, T_3 – периоды основного тона и двух обертонов, с; n – номера главных форм колебаний; a – длина водохранилища, м.

Сейшевые колебания – это стоячие волны (рис 38)



Рис. 36. Сейшевые колебания: a – одноузловые, b – двухузловые

Например, в Финском заливе наблюдались одно, двух, трёх и четырёхузловые сейши. Амплитуда сейшевых колебаний зависит от энергии возмущающего источника и размеров водоёма. Так, в Азовском море наблюдались сейши с амплитудой $10 \div 25$ см и периодом около 23 часов, в Женевском озере – амплитудой до двух метров и периодом более одного часа.

Третье обстоятельство, влияющее на величину подъёма уровня воды в заливах, бухтах, связано с ветровым нагоном воды.

Когда все перечисленные факторы действуют одновременно, уровень воды поднимается особенно высоко.

На рис. 37 в качестве примера показано изменение уровня воды в г. Ленинграде при наводнении 23.09.1924 г. [41]. Подъем уровня воды начался в 10 часов утра. Максимальный подъем уровня (3,8 м) наблюдался в 20 часов, после чего начался спад воды.

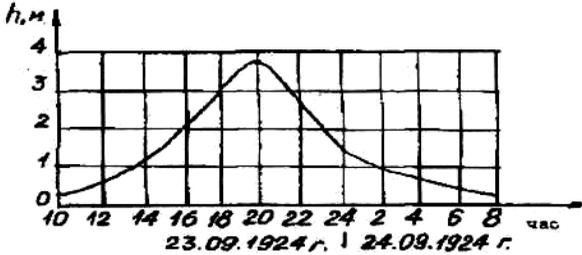


Рис. 37. Изменение уровня воды в Ленинграде

На рис. 38 показано положение поверхности Финского залива в это время.

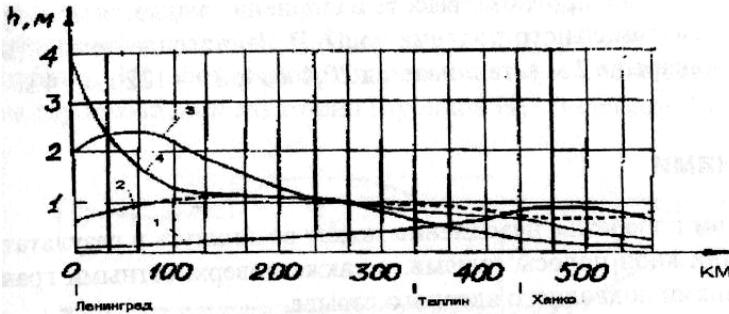


Рис. 38. Профили свободной поверхности Финского залива

На этом рисунке кривая 1 отвечает положению свободной поверхности на время 10 часов, кривая 2 – на 13 часов, кривая 3 – на 17 часов, кривая 4 – на 20 часов. Видно, как по заливу движется длинная волна и как повышается уровень воды в восточной части залива. Волна сгенерирована мощным циклоном, прошедшим через Балтийское море.

На основании многолетних наблюдений для оценки подъема воды в Ленинграде при нагонном наводнении установлена зависимость [41]

$$h_{\text{Л}} = 2,5h_{\text{Т}} + \Delta h, \quad (5.24)$$

где $h_{\text{Л}}$ – высота подъема воды в Ленинграде; $h_{\text{Т}}$ – высота волны в районе Таллинна; Δh – дополнительный подъем уровня воды, связанный с ветровым нагоном воды.

Значения Δh зависят от скорости ветра вдоль оси залива:

$$V = 2V_{\text{Т}+3} - V_{\text{Т}}, \quad (5.25)$$

где $V_{\text{Т}}$ – проекция скорости ветра на ось залива в момент максимального уровня воды в Таллинне; $V_{\text{Т}+3}$ – то же, спустя 3 часа, в районе островов Мощный и Гогланд (расстояние до Ленинграда ~140 км).

Связь величин V и Δh показана в табл. 25 [42].

Таблица 25

Значения ветрового нагона воды в Ленинграде в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра V , м/с	0	10	15	20	25
Ветровая надбавка Δh , см	0	27	51	83	134

Формулами (5.24), (5.25) пользуются всякий раз, когда Ленинграду (ныне Санкт-Петербургу) угрожает наводнение. По синоптическим картам, составляемым через каждые 3 часа, и регулярным измерениям уровня воды на берегах Балтийского моря и Финского залива СПб бюро погоды следит за движением циклона, стадиями его развития и продвижением длинной волны. Так как Таллинн расположен западнее Ленинграда на расстоянии ~330 км, уточненный прогноз о высоте наводнения выдается примерно за 5 – 6 часов до максимального подъема воды. В Ленинграде при подъеме воды выше ординара на 2 м затопляется 20,4 км²; 3 м – 122 км²; 4 м – 167 км² [42].

5.6. Цунами

На морском побережье наводнение может возникнуть в результате затопления прибрежной полосы цунами, а также поверхностными гравитационными волнами подводного ядерного взрыва.

Цунами образуются при извержениях подводных вулканов в океане и землетрясениях, когда происходит сдвиг вверх или вниз протяженных

участков дна. Они наиболее характерны для бассейна Тихого океана. Считается, что места возникновения цунами находятся в районах известных впадин, таких как Алеутская, Курило-Камчатская, Тускарора (у Японии), Филиппинская, Атакама (у берегов Чили и Перу) и др. Цунами представляют собой волну (или серию волн) очень большой длины, достигающей порядка нескольких десятков километров, иногда до 100 – 200 км, и сравнительно небольшой высоты от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Отмечались цунами и большей высоты. Так при извержении в 1883 году вулкана Кракатау образовались волны цунами высотой более 30 м. Профиль цунами приведен на рис. 39.

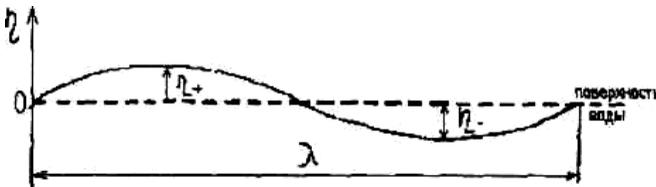


Рис. 39. Профиль цунами

На этом рисунке обозначено: $\eta = \eta_+ + \eta_-$ – высота волны, η_+ – гребня, η_- – глубина впадины, λ – длина волны.

Цунами распространяются на большие расстояния порядка нескольких тысяч километров. Волна в океане пологая.

Скорость распространения цунами определяется по формуле

$$N = \sqrt{gH_0}, \quad (5.26)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; H_0 – глубина акватории, м. Скорость может достигать до 300 м/с, то есть до ≈ 1000 км/час (при $H_0 \approx 10000$ м).

Цунами опасны у побережья. При уменьшении глубины акватории скорость распространения волны уменьшается; как следствие, уменьшается её длина и возрастает высота. При определении параметров волны на акватории переменной глубины (рис. 40) все величины, рассчитываемые для точки с глубиной H_* , обозначаются индексом (*), а соответствующие величины на глубоководной акватории глубиной H_0 – индексом (0).

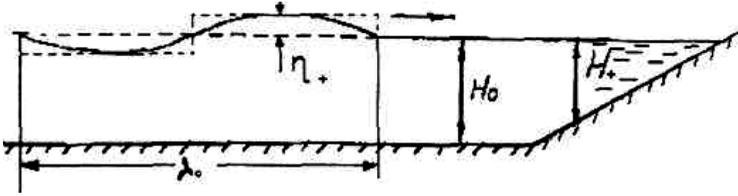


Рис. 40. Выход волны на мелководье

Для определения высоты волны при ее выходе на мелководье рассмотрим по аналогии с [12] потенциальную энергию массы воды в гребне высотой $h_0 = \eta_+$ единичной толщины. Если бы гребень имел прямоугольную форму, изображенную на рис. 40 пунктиром, то искомая энергия составляла бы значение

$$E = mg \frac{h_0}{2} = \left(\rho h_0 \frac{\lambda_0}{2} \right) g \frac{h_0}{2} = \frac{1}{4} \rho g h_0^2 \lambda_0, \quad (5.27)$$

где m – масса воды; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

В реальных условиях гребень волны имеет форму, близкую к синусоидальной. Поэтому вместо соотношения (5.27) следует записать

$$E = \frac{1}{4} \alpha \rho g h_0^2 \lambda_0, \quad (5.28)$$

где величина $0 < \alpha < 1$.

При перемещении волны с относительно глубокого места (где параметры гребня h_0 и $\lambda_0/2$) на более мелкое, высота и длина гребня изменятся и составят h_* и $\lambda_*/2$. Значение энергии E при таком перемещении волны не изменится. Тогда имеет место соотношение

$$h_0^2 \lambda_0 = h_*^2 \lambda_*. \quad (5.29)$$

Учитывая, что величина $\lambda = cT = \sqrt{gH} \cdot T$, где c – скорость распространения волны, T – ее период, H – глубина акватории, можно получить

$$h_* = h_0 \sqrt[4]{\frac{H_0}{H_*}}. \quad (5.30)$$

Это соотношение известно как формула Эри-Грина [40, 41]. Длина волны на мелководье

$$\lambda_* = \lambda_0 \sqrt{\frac{H_*}{H_0}}. \quad (5.31)$$

Пример. Волна цунами возникла в океане, где глубина 6250 м; параметры волны: длина 50 км, высота 1,5 м. Определить длину и высоту волны при ее выходе на мелководье, где глубина составляет 10 м.

Решение: 1. По формуле (5.31) вычисляем длину волны:

$$\lambda_* = 50000 \sqrt{\frac{10}{6250}} = 2000 \text{ м} = 2 \text{ км}.$$

2. По формуле (5.30) находим высоту волны:

$$h_* = 1,5 \sqrt[4]{\frac{6250}{10}} = 7,5 \text{ м}.$$

С дальнейшим уменьшением глубины акватории, когда высота гребня волны $\eta_+ = (0,5 \div 0,6)\eta$ становится примерно равной глубине H_* , происходит ее обрушение, то есть преобразование волны в стремительно движущийся поток высотой $h_{\text{п}}$ с крутым фронтом. Данную глубину обозначают $H_{\text{кр}}$, при этом $h_{\text{п}} = H_{\text{кр}}$. Если расстояние от этой точки до берега меньше $\frac{1}{4}\lambda_{\text{кр}}$, где $\lambda_{\text{кр}}$ – длина волны при $H_{\text{кр}}$, что

нередко бывает в реальных условиях, то образовавшийся гидропоток движется к берегу, практически не меняя своей высоты. Вся эта бушующая масса воды врывается на берег и продвигается по нему, пока не достигнет высоты, которую имел поток при подходе к берегу, а нередко по инерции заплескивает и дальше [41].

Скорость потока $V_{\text{п}}$, м/с, при подходе к берегу оценивается по соотношению

$$V_{\text{п}} = \alpha \sqrt{gh_{\text{п}}}, \quad (5.32)$$

где коэффициент $\alpha = 1,7 \div 1,8$.

Высота h , м, и массовая скорость воды V , м/с, при движении по берегу оцениваются по соотношениям

$$h \approx h_n \left(1 - \frac{l}{L}\right); \quad V \approx V_n \sqrt{\left(1 - \frac{l}{L}\right)}, \quad (5.33)$$

где l – расстояние от уреза воды; L – наибольшая дальность выкатывания потока.

Например, при высоте потока $h = 10$ м и уклоне берега $i = 0,001$ дальность выкатывания потока $L \approx 9$ км, при $i = 0,005$ значение $L \approx 1,9$ км, при $i = 0,01$ значение $L \approx 1$ км.

Опасность цунами увеличивается при входе волны в бухты, сужающиеся заливы. Высота цунами при этом дополнительно увеличивается [3]:

$$h_* = h_0^4 \sqrt{\frac{H_0}{H_*}} \sqrt{\frac{B_0}{B_*}}, \quad (5.34)$$

где B_0 – ширина бухты, залива на входе, B_* – аналогичная ширина в заданном створе, а величины η_* , η_0 , H_* , H_0 , имеют тот же смысл, что и в формуле (5.30). И если у побережья высота цунами достигает нередко 10 м, то в неблагоприятных по рельефу участках (клинообразных сужениях бухт с крутыми берегами) до 30 м [35,43].

К катастрофическим цунами XX века следует отнести цунами в районе о. Хонсю от подводного землетрясения 1933 г. Первые волны подошли к побережью примерно через полчаса после землетрясения. Периоды волн составляли в среднем 10 – 20 минут. На побережье волны достигали высоты 10 – 22 м. В одном из ущелий, по которому протекала река, высота подъёма уровня составила 28,7 м. Цунами распространились по акватории Тихого океана. Отразившись от берегов Америки, они вернулись обратно, при этом за 47 часов дважды пересекли океан.

Волны цунами, возникшие при землетрясении в Чили 21 и 22 мая 1960 г., достигали высоты 20 м и произвели опустошительные разрушения на побережье Чили и на многих островах у побережья. На некоторых островах в живых не осталось ни одного человека [35].

В нашей стране действию цунами подвержено дальневосточное побережье и особенно Камчатка и Курильские острова.

5.7. Сели

Сель (от арабского "сайль" – бурный поток) – грязевые или грязекаменные потоки, внезапно возникающие в руслах горных рек при больших уклонах дна в результате интенсивных и продолжительных ливней, бурного таяния ледников и снежного покрова, а также при обрушении в русло больших количеств рыхлообломочных материалов. По составу селевой массы различают сели: грязевые, грязекаменные, водокаменные, а по физическим свойствам – несвязные и связные. В несвязных селях транспортирующая среда для твердых включений - это вода, а в связных – водогрунтовая смесь, в которой основная масса воды связана тонкодисперсными частицами. Содержание твердого материала (продуктов разрушения горных пород) в селевом потоке может составлять от 10 % до 75 % [14].

В отличие от обычных водных потоков сели движутся, как правило, не непрерывно, а отдельными валами (волнами), что обусловлено их механизмом формирования и заторным характером движения – образованием в сужениях и на поворотах русла скоплений твердого материала с последующим их прорывом. Сели движутся со скоростью до 10 м/с и более. Мощность (высота) селевого потока может достигать до 30 м. Объем выносов составляет сотни тысяч, иногда миллионы м³, а крупность переносимых обломков до 3...4 м в поперечнике при массе до 100...200 тонн.

Обладая большой массой и скоростью движения, сели разрушают промышленные и жилые здания, инженерные сооружения, дороги, линии электропередач и связи.

Для оценки последствий воздействия селевого потока на конкретное здание, сооружение необходимо знать величину давления P на их стены. Давление P определяется гидростатическим давлением, скоростным напором потока и геометрией объекта.

При действии селевого потока на поверхность объекта, перпендикулярную направлению потока, давление P , Па, в точке на глубине h определяется по соотношению [14]

$$P = P_c + P_d, \quad (5.35)$$

где $P_c = \rho gh$ – гидростатическое давление; $P_d = \frac{1}{2} C_p \rho V^2$ – динамическое давление (скоростной напор).

Здесь ρ – плотность селевого потока, кг/м^3 ; h – глубина точки наблюдения, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; C – коэффициент взаимодействия.

Для случая действия селевого потока по нормали к поверхности объекта допускается принимать $C \approx 1$; если поверхность расположена под углом α к направлению движения потока принимают $C \approx \sin^2 \alpha$.

Сила, действующая на поверхность от давления селевого потока, определяется по соотношению

$$F = S(P_{\text{cp}} + P_{\text{д}}) = \frac{1}{2} S \rho (gH + CV^2), \quad (5.36)$$

где S – нагружаемая площадь поверхности объекта, м; H – глубина потока, м; $P_{\text{cp}} = \frac{1}{2} \rho gH$ – среднее гидростатическое давление по нагружаемой поверхности объекта, Па.

5.8. Защитные мероприятия от наводнений

В результате подъёма воды при наводнениях происходит затопление территорий с расположенными на них населенными пунктами, объектами промышленности, энергетики, транспорта, связи, сельского хозяйства, другими элементами инфраструктуры. Кроме того, происходит подтопление различных сооружений по различного рода каналам (канализация, ливневые стоки, канавы, траншеи), а также из-за увеличения подпора грунтовых вод. Затопление и подтопление наносят большой ущерб экономике. При наводнении повреждаются или разрушаются здания, сооружения, различные коммуникации, мосты, дамбы, дороги, утрачиваются материальные и культурные ценности и личное имущество граждан, гибнет урожай, смываются почвы и т. д. Наконец, наводнение часто сопровождается гибелью людей и животных.

Затопление и длительное стояние воды может вызвать различные вторичные последствия: замыкание электрических сетей и возгорание объектов, вымывание и перенос из поврежденных хранилищ радиоактивных и вредных химических веществ и заражение ими обширных территорий.

Материальный ущерб при наводнении может быть существенно уменьшен, а человеческие потери предотвращены или уменьшены

путем проведения специальных инженерных мероприятий, а также созданием системы оповещения и защиты, подготовкой сил и средств для ведения работ по локализации наводнения, экстренной эвакуации, поиску и спасению людей, животных, материальных и культурных ценностей.

Важное значение для проведения предупредительных мер и подготовки условий для организации и проведения всех видов спасательных и других работ при наводнении имеет своевременный гидрометеорологический прогноз. Существующая в нашей стране система прогнозов включает: долгосрочные – более трех месяцев до наводнения, среднесрочные – от 10 – 12 суток до 2 – 3 месяцев, краткосрочные – до 10 – 12 суток.

В настоящее время накоплен большой фактический материал, разработан целый ряд методик по прогнозированию наводнений различных типов. Работы в этом направлении продолжаются.

Основой для организации превентивных и оперативных мероприятий по защите от наводнений являются карты затопления различных территорий и объектов, на которые нанесены контуры площадей, затапливаемых при нескольких возможных уровнях воды, превышающих критический уровень. Эффективным способом защиты от наводнений является строительство гидротехнических сооружений: плотин, дамб, водохранилищ и прудов, обводных каналов, укрепление берегов.

В селеопасных районах для защиты от селей строятся противоселевые плотины, проводится профилактический спуск угрожающих прорывом водоемов, особое внимание обращается на закрепление и развитие растительного покрова на горных склонах.

Наиболее опасны наводнения прорыва при разрушении плотин водохранилищ на реках и наводнения в прибрежной полосе, которые создаются цунами.

Для оповещения о наводнении прорыва создается система автоматической сигнализации, включающая специальные датчики, устанавливаемые как на плотине, так и в нижнем бьефе на некотором удалении от плотины; каналы связи, по которым данные о катастрофе передаются в систему оповещения гражданской обороны и другим заинтересованным организациям.

Служба оповещения о цунами в нашей стране создана в 1956 году. Она включает в себя три станции: Петропавловск-Камчатский, Курильск, Южно-Сахалинск. Станции ведут сейсмонаблюдения, анализируют и прогнозируют цунами. Станции могут предсказать факт

возникновения цунами, примерное время подхода волны и оповестить население об опасности. Служба предупреждения о цунами входит в Международную службу с центром в Гонолулу (Гавайские острова). Для повышения эффективности прогнозов и оповещения создается Единая автоматизированная система в составе Госгидромета по наблюдению за цунами и передаче информации в систему оповещения Гражданской обороны. Наиболее эффективный способ защиты – своевременная эвакуация людей за пределы затопляемой территории, выход судов в открытое море, заблаговременное проведение защитных инженерных мероприятий.

Глава 6. КАТАСТРОФЫ, СВЯЗАННЫЕ С АТМОСФЕРОЙ

6.1. Опасные атмосферные явления

Катастрофические явления в атмосфере вызываются «плохой» погодой: сильные ветры, значительные перепады давления и большие количества осадков являются причинами разрушений и гибели людей. Так, от ураганных ветров небывалой силы и гигантских волн, обрушившихся в ноябре 1970 г. на прибрежные районы Восточного Пакистана, пострадало в общей сложности около 10 млн. человек, в том числе примерно 0,5 млн. человек погибли или пропали без вести.

Большинство опасных атмосферных явлений представлено разными формами вихрей: торнадо (смерчи), тайфуны, циклоны. Порядок величины кинетической энергии таких атмосферных явлений показан в табл. 26.

Таблица 26

Энергия атмосферных вихрей

Атмосферное явление	Кинетическая энергия, Дж
Циклон	$4 \cdot 10^{17}$
Тайфун (тропический циклон)	$4 \cdot 10^{16}$
Торнадо	$4 \cdot 10^{10}$

Из таблицы видно, что энергия тайфунов и циклонов примерно в 10 и 100 раз соответственно превышает энергию $E = 4,2 \cdot 10^{15}$ Дж, выделяющуюся при ядерном взрыве мощностью $q = 10^6$ тонн тротила.

К опасным атмосферным явлениям относятся также пыльные и песчаные бури, возникающие при сильных ветрах в засушливое время в степных, полупустынных и пустынных районах, а также грозовые электрические разряды – молнии.

Например, во время песчаной бури на юге Украины в апреле 1928 г., названной «черной» бурей, облака пыли охватили пространство более 1 млн. км². Сельскому хозяйству региона был нанесен значительный ущерб.

Ущерб, наносимый молниями, связан с сильными электрическими разрядами. При этом могут быть поражены люди, могут возникнуть пожары в зданиях, других сооружениях, в лесу.

Наконец, в связи с интенсивным выбросом в последнее время в атмосферу промышленных газов связывают такие явления, как парниковый эффект атмосферы, возможное потепление климата и, как следствие, возможность глобальной экологической катастрофы.

6.2. Вихревые движения в атмосфере

Формирование опасных атмосферных явлений связано со слоем воздушной оболочки Земли, прилегающим к ее поверхности (тропосферой). Давно известно существование общей глобальной циркуляции атмосферы. Моряки отмечали, в частности, наличие устойчивых пассатных ветров, которые позволяли в эпоху парусного флота совершать дальние морские переходы. Эти ветры обусловлены общим распределением атмосферного давления, которое в северном полушарии характеризуется максимумом ~ 1018 мбар ($1 \text{ мбар} = 100 \text{ Па}$) около полюса, понижением давления до $1011 \div 1012$ мбар в субполярном районе, т.е. 65° северной широты, повышением давления снова до ~ 1018 мбар на 35° северной широты (зона штилей) и новым минимумом $\sim 1011 \div 1012$ мбар вблизи экватора. В результате такого распределения давления воздух поднимается над экватором, движется на большой высоте к полюсу, спускается в зоне штилей и затем перемещается вблизи поверхности к экватору, образуя ветры. Сила Кориолиса, обусловленная вращением Земли вокруг своей оси, проявляется в северном полушарии в отклонении к востоку от меридионального направления южного ветра.

Для понимания механизма действия силы Кориолиса рассмотрим случай движения материальной точки M с постоянной скоростью W_r по меридиану шара, вращающегося с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси z (рис. 41).

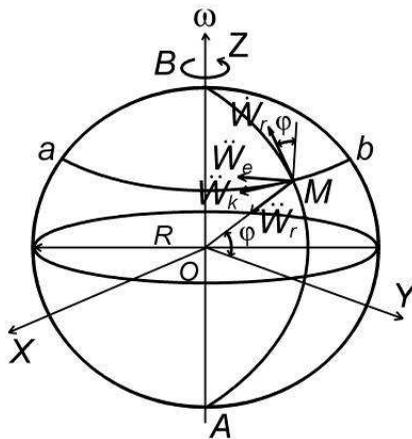


Рис. 41. Схема движения точки по меридиану вращающегося вокруг оси шара

При таком движении точка испытывает ускорение [44]

$$\vec{\ddot{W}} = \vec{\ddot{W}}_e + \vec{\ddot{W}}_r + \vec{\ddot{W}}_k, \quad (6.1)$$

где $\vec{\ddot{W}}, \vec{\ddot{W}}_e, \vec{\ddot{W}}_r, \vec{\ddot{W}}_k$ – векторы (направление векторов $\vec{\ddot{W}}_e, \vec{\ddot{W}}_r, \vec{\ddot{W}}_k$ показано на рис. 41).

Названия и численные значения ускорений:

$\vec{\ddot{W}}$ - полное ускорение;

$\vec{\ddot{W}}_e = r\omega^2 = \omega^2 R \cos \varphi$ – переносное ускорение, обусловленное вращением шара вокруг оси z ;

$\vec{\ddot{W}}_r = \dot{W}_r^2 / R$ – относительное ускорение, обусловленное движением точки M по дуге окружности AB ;

$\vec{\ddot{W}}_k = 2(\omega \times \dot{W}_r) = 2\omega \dot{W}_r \sin \varphi$ – Кориолисово ускорение, обусловленное совместным действием двух движений (вращением шара и движением точки по дуге окружности AB).

В соотношениях (6.1) обозначено: R – радиус шара, r – радиус круга на параллели ab , угол φ – широта точки M . Ускорение Кориолиса равно удвоенному векторному произведению скорости ω на скорость \dot{W}_r . Чтобы определить направление вектора $\vec{\ddot{W}}_k$, которое совпадает с направлением векторного произведения $(\omega \dot{W}_r)$, нужно перенести вектор ω в точку M и восстановить в этой точке перпендикуляр к плоскости, в которой лежат векторы ω и \dot{W}_r . Вектор $\vec{\ddot{W}}_k$ будет направлен по этому перпендикуляру в ту сторону, чтобы наблюдателю, смотрящему с его конца, поворот вектора ω на угол φ до совмещения его с вектором \dot{W}_r , представлялся происходящим против часовой стрелки (см. рис. 41).

Следует отметить, что Кориолисова сила – это инерционная сила; она направлена противоположно ускорению $\vec{\ddot{W}}_k$.

Рассмотрим два частных случая:

1. Если скорость $\dot{W}_r \perp \omega$, что наблюдается на «полюсе» шара, то $\varphi = 90^\circ$, $\sin \varphi = 1$ и $\vec{\ddot{W}}_k = 2\omega \dot{W}_r$.

2. Если скорость $\dot{W}_r \parallel \omega$, что имеет место на экваторе, то $\varphi = 0$, $\sin \varphi = 0$ и $\vec{\ddot{W}}_k = 0$.

Таким образом, при движении точки по меридиану вращающегося шара Кориолисова сила максимальна на его полюсах и равна нулю в точках на экваторе.

Действием силы Кориолиса, возникающей вследствие вращения Земли вокруг своей оси, объясняется так называемый закон Бэра, то есть размывание правых берегов рек в северном полушарии и, наоборот, левых берегов рек в южном полушарии, текущих в направлении меридиана [45].

При движении точки по параллели, то есть по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной к оси вращения Земли, сила Кориолиса направлена по радиусу этой окружности к ее центру, если точка движения в западном направлении, и по радиусу от центра окружности, если точка движения в восточном направлении. При этом точка будет прижиматься к земной поверхности, если движется на запад, и, наоборот, отдаляться от нее, если движется на восток [45].

В общем случае движения точки по поверхности вращающегося шара под некоторым углом к меридиану скорость точки можно разложить на две составляющие, одна из которых направлена по меридиану, другая – по параллели. Применительно к каждой из составляющих справедливы пояснения, приведенные выше.

Специфические атмосферные явления связаны с образованием центров низкого и высокого давления вследствие нагревания земной (водной) поверхности. Перепады давления в горизонтальном направлении совместно с действием силы Кориолиса приводят к образованию сложных воздушных течений. Так, например, образование центра низкого давления приводит к формированию сходящегося к этому центру движения воздуха. Сила Кориолиса, действующая одновременно на обе противоположно направленные (сходящие) меридиональные составляющие течения воздуха приводит к возникновению вращающего момента относительно рассматриваемого центра давления.

При качественном описании этих течений можно пренебречь вертикальными ускорениями (в том числе и обусловленными движением воздушных потоков по параллели) и силами трениями – такие течения называются геострофическими [11].

Сила Кориолиса, действующая на единичный объем воздуха и направленная по нормали к вектору скорости ветра V , определяется по соотношению

$$F_1 = 2\rho\omega V \sin \varphi, \quad (6.2)$$

где φ – широта места; ω – угловая скорость вращения Земли; ρ – плотность воздуха.

Вторая сила F_2 , влияющая на геострофическое течение, связана с горизонтальным градиентом давления и действует нормально к изобарам. Обозначив этот градиент через $\partial p / \partial n$, можно получить

$$F_2 = \frac{\partial p}{\partial n}. \quad (6.3)$$

В стационарном геострофическом потоке F_1 , равно F_2 . Поэтому геострофический ветер направлен вдоль изобар со скоростью

$$V = \frac{1}{2\rho\omega\sin\varphi} \cdot \frac{\partial p}{\partial n}. \quad (6.4)$$

Таким образом, при наличии центров низкого и высокого давления с окружающими их замкнутыми изобарами, вокруг этих центров образуются круговые потоки. Они представлены вихрями различных размеров. Трение, имеющее место в реальном потоке, снижает скорость ветра, вследствие чего уменьшается и сила Кориолиса. В связи с этим в вихре, вращающемся вокруг центра низкого давления, воздух смещается к центру, при этом скорость ветра увеличивается вследствие постоянного углового момента.

Кроме того, из соотношения (6.4) следует, что скорость ветра в вихре прямо пропорциональна величине градиента давления $\partial p / \partial n$ и обратно пропорциональна широте места, то есть при движении вихря из зоны низких широт в зону высоких широт он постепенно ослабевает и расстраивается.

Рассмотрим особенности крупных атмосферных вихрей. Самый крупный атмосферный вихрь – это циклон (рис. 35). Диаметр циклона – 1000 ÷ 2000 км, высота – 2 ÷ 10 км, давление в центре – 950 ÷ 960 мбар, иногда 930 мбар (атмосферное давление на уровне моря – 1012 мбар), средняя скорость его перемещения – 30 ÷ 45 км/час. Воздушные массы в циклоне движутся по спирали, закручивающейся к его центру (против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном), где они поднимаются вверх, порождая сильную облачность. Поэтому с приходом циклона, как правило, связывают выпадение осадков. Скорость ветра в циклоне обычно не превышает 20 м/с (иногда 30 м/с).

Тайфун – это разновидность циклона, так называемый тропический циклон. В переводе с китайского тайфун – очень сильный ветер; в Америке его называют ураганом. Тайфуны обычно зарождаются в низких широтах субтропических областей и перемещаются в направлении от низких к более высоким широтам. Они представляют собой атмосферные вихри диаметром несколько сот километров. Давление в центре может составлять ~900 мбар, иногда еще меньше. Сильное снижение давления в центре и небольшие размеры по сравнению с обычным циклоном приводят к образованию значительного градиента давления в радиальном направлении. Поэтому ветер в тайфуне достигает $30 \div 50$ м/с; максимальная скорость 64 м/с была зафиксирована в сентябре 1928 г. в городе Сан-Хуане (Пуэрто-Рико) [11]. Тангенциально дующие ветры обычно окружают спокойную зону, называемую глазом тайфуна. Она имеет в среднем 25 км в диаметре, иногда $50 \div 60$ км. По ее границе образуются облачная стена, напоминающая стену вертикального кругового колодца [46].

При прохождении тайфуна по морю уровень воды в зоне глаза тайфуна (и за ее пределами) поднимается. Согласно соотношению (5.22) высота подъема при $p \sim 900$ мбар может превышать один метр. Это уже существенно. Ведь барический подъем воды происходит сразу на большой площади, измеряемой сотнями и тысячами квадратных километров. Подъем воды становится особо опасным, когда глаз тайфуна выходит на мелководное побережье (особенно в сужающиеся, бухты) и формируется штормовой прилив.

Кроме того, большая скорость ветра в тайфуне приводит к образованию крупных штормовых волн. Их высота может достигать $20 \div 25$ м. Волны существенно увеличивают силу штормового прилива. В результате этот прилив оказывается для жителей побережья не менее грозным явлением природы, чем цунами [12]. Сильные дожди, сопровождающие тайфуны, могут вызвать на суше катастрофический паводок. Выпадение 500 мм приблизительно за пол дня не является редким исключением. В результате сильного ливня во время урагана Агнесса в июне 1972 г. на горе Митчелл (штат Северная Каролина, США) выпало 2530 мм осадков менее чем за 48 часов.

Известна легенда о Всемирном потопе. Согласно одной из гипотез описание потопа в Библии является пересказом шумеро-вавилонского предания об исключительно сильном наводнении, случившемся в давние времена в нижнем течении Евфрата и затопившем почти всю Месопотамскую низменность. Причиной его предполагается небывало мощный тайфун в Персидском заливе, который вызвал обильные дожди

и нагнал огромные массы воды в устье Евфрата и долину реки [12]. Гипотеза, несомненно, нуждается в серьезном обосновании и проверке. Известны и другие гипотезы (см п. 6.8).

Таким образом, тайфуны – это всегда ураганные ветры, наводнения, разрушения и человеческие жертвы.

Торнадо (или смерч) – вихревое движение воздуха, возникающее в грозовом облаке, имеющее вид опрокинутой воронки, и затем распространяющееся по направлению к поверхности земли (воды) в виде хобота, разреженного внутри [11]. Торнадо по своим масштабам относятся к относительно небольшим, но очень опасным природным явлениям. Они редко превышают 1,5 км в диаметре; многие имеют диаметр менее 100 м. Средняя скорость их перемещения ~70 км/час, иногда ~100 км/час. Хобот приблизительно можно представить в виде вихревой трубки. Скорость воздуха в стенке трубки достигает 100 ÷ 150 м/с (и даже больше). Отмечалась разность в давлении до 80 мбар внутри и вне хобота. Разрушения при прохождении торнадо вызываются большой скоростью ветра и резким перепадом давления, так как толщина стенки хобота невелика. Торнадо вырывает с корнями деревья, опрокидывает автомобили, поезда, корабли, поднимает в воздух или опрокидывает дома, сбрасывает с них крыши или полностью разрушает. Переносит в сторону, иногда на несколько километров, различные предметы, животных. По пути движения он всасывает в себя воду небольших озер, водоемов вместе с населяющими их флорой, фауной, которая переносится затем на большие расстояния и выпадает на землю вместе с дождем.

6.3. Механизм разрушительного действия атмосферных вихрей

Разрушения и повреждения, которые торнадо наносит сооружениям, вызываются в основном двумя факторами: прямым давлением ветра, обусловленным его высокой скоростью, и взрывным эффектом, связанным с быстрым падением давления в центре торнадо.

Силы, обусловленные движущимся воздушным потоком, – это сдвигающая сила, действующая на здание в горизонтальном направлении, и подъемная сила, действующая на крышу (эффект самолетного крыла).

Сдвигающая сила определяется по формуле

$$F = \frac{1}{2} C_x \rho V^2 S, \quad (6.5)$$

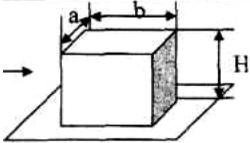
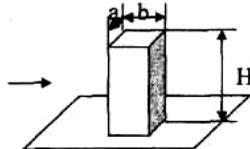
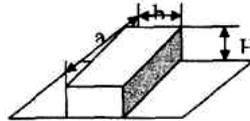
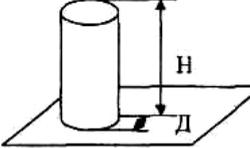
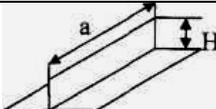
где F – сила, Н; S – площадь поперечного сечения здания, м²; C_x – коэффициент лобового сопротивления.

В данной формуле величина $\frac{1}{2}\rho V^2$ – это скоростной напор воздушного потока, Па (ρ – плотность воздуха, кг/м³; V – скорость воздушного потока, м/с).

Значения коэффициента C_x для некоторых простых геометрических тел приведены в табл. 27 [47].

Таблица 27

Значения коэффициента лобового сопротивления

Название тела	Схема расположения	Соотношение сторон	Величина C_x
Куб		$a = b = H$	1,5
Квадратная призма		$a = b = 0,36H$	1,3
Квадратная призма		$H = b = 0,06a$	1,2
Круговой цилиндр		$D = 0,36H$	0,73
Вертикальная стенка		$H = 0,06a$	1,25

В центре торнадо существует зона низкого давления. Когда центр торнадо проходит над зданием, давление внутри здания не может мгновенно сравниться с наружным и поэтому оно (здание) может разрушиться под действием разности давлений, как бы «взрывается».

Разрушительное действие тайфунов зависит от трех факторов: больших скоростей ветра, наводнений, штормовых волн.

Сила воздействия давления ветра такая же, как рассмотренная выше, только несколько слабее, поскольку скорость воздушного потока обычно ниже, чем в торнадо. Взрывной эффект, проявляющийся в зданиях под влиянием низкого давления в центре торнадо, в тайфунах выражен также слабее, поскольку градиент давления в них меньше и, кроме того, успевает произойти относительное выравнивание давления внутри и снаружи зданий.

Наибольшие разрушения и человеческие жертвы при тайфунах связаны со штормовыми приливами, обрушивающимися на прибрежные участки местности. Действие их такое же, как действие цунами. Большую опасность при тайфунах представляют также наводнения, вызываемые выпадением значительного количества осадков. Как отмечалось в предыдущем параграфе, выпадение 500 мм осадков и более не является редким исключением.

Воздействие циклонов связано в основном с действием ветра.

Характер разрушений и повреждений зданий и сооружений при прохождении торнадо, тайфунов, циклонов в зависимости от скорости ветра показан в табл. 28.

6.4. Интенсивность ветров. Оценка воздействия ветра на различные объекты

Градация скорости ветра, показывающая условия его перехода в грозное стихийное явление, до 1946 г. давалась по 12-балльной шкале, предложенной в 1806 г. английским адмиралом Бофортом. Позднее она была расширена. Для последнего 12 балла (ураган) введено шесть уточняющих подразделений, табл. 28 [1].

Таблица 28

Градация ветров в зависимости от скорости воздушного потока

Балл	Ветер	Скорость V , м/с	Действие ветра
1	2	3	4
0	Штиль	0	Полное отсутствие ветра. Дым из труб поднимается вертикально.
1	Тихий	0,9	Дым слегка отклоняется.
2	Легкий	2,4	Движение ветра ощущается лицом. Шелест листьев

1	2	3	4
3	Слабый	4,4	Колеблются тонкие ветки. Развеваются флаги. Начинается легкий перенос снега по поверхности снежного покрова.
4	Умеренный	6,7	Поднимается пыль. Колеблются небольшие сучья. Снегопад переходит в метель.
5	Свежий	9,3	Колеблются средней толщины сучья. Дым срывается при выходе из труб. На воде появляются волны.
6	Сильный	12,3	Качаются большие сучья, раскачиваются тонкие стволы деревьев. Гудят провода. Шум ветра слышен в домах. На море удлиненные волны, белые барашки.
7	Крепкий	15,5	Качаются стволы деревьев. Идти против ветра трудно. На море поднимаются пенящиеся волны.
8	Очень крепкий	18,9	Ломаются ветви деревьев. Идти против ветра очень трудно. Волны на море высокие и длинные. Взлетают брызги.
9	Шторм (буря)	22,6	Немного разрушаются здания. Деревья изгибаются, ломаются ветви. Срывается черепица с крыш. Волны на море высокие. Гребни волн опрокидываются и рассыпаются.
10	Сильный шторм	26,4	Значительно разрушаются здания. Деревья ломаются и вырываются с корнем. Волны очень высокие и покрыты белой пеной. Плохая видимость.
11	Жестокий шторм	30,5	Здания сильно разрушаются. Срываются крыши. Волны на море столь высоки, что скрывают суда среднего размера; края волн сдуваются в пену.
12	Ураган	34,8	Опустошительные разрушения. Разрушаются деревянные здания. На море очень высокие волны. Море покрыто полосами пены. Видимость плохая.
13	Сильный ураган	39,2	Опустошительные разрушения
14	То же	43,8	Разрушаются каменные сооружения и металлические мосты.
15	То же	48,6	То же
16	То же	53,5	То же
17	То же	58,6	То же

С учетом данных табл. 28, а также дополнительных материалов в литературе [1] даются следующие оценки по воздействию ветра на различные сооружения (табл. 29).

Воздействие ветра на сооружения

Степень разрушения сооружения	Скорость ветра, м/с
Повреждение	20,8...28,5
Слабое разрушение	32,7...39,2
Среднее разрушение	43,8...48,6
Сильное разрушение	53,5...58,6
Полное разрушение	65...330

К недостаткам этой таблицы следует отнести отсутствие дифференциации данных по типам зданий, сооружений. Тем не менее, используя данные табл. 26, соотношение (6.5) – для определения критериев поражения, – по формулам (2.15) – (2.19) можно оценить вероятность поражения того или иного сооружения и согласно рекомендациям п. 2.4. – математическое ожидание ущерба.

6.5. Прогноз погоды. Защитные мероприятия против ураганных ветров

Большое значение для проведения эффективных предупредительных мер имеет своевременный и достоверный метеорологический прогноз. Существующая система прогнозов, как и при прогнозах наводнений, включает в себя краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный прогнозы.

Краткосрочный и среднесрочный прогнозы основываются на наблюдениях за погодой, которые проводятся с помощью широкой сети стационарных метеостанций, самолетов, кораблей, а также искусственных спутников Земли. На основании полученных данных составляются синоптические карты. Прогноз погоды широко оповещается в средствах массовой информации: печати, радио, телевидении.

Долгосрочный прогноз основывается на многолетних наблюдениях за погодой в определенном районе с учетом данных наблюдений в других районах. На базе полученных данных выясняются закономерности погодных и климатических изменений, закономерности движения атмосферных вихрей, оцениваются риск ураганных ветров. В соответствии с долгосрочным прогнозом территория СНГ по расчетным нормативным скоростным напорам ветра (см. табл. 30) делится на семь районов (СНиП 11-А-6-74) [47]:

районы I и II – центральная область, север и северо-восток Европейской части страны, западная и центральная части Сибири;

район III – побережье Рижского и Финского заливов, Карпаты и Прикарпатье, юг Европейской части страны, Закавказье, Казахстан, район г. Норильска, Биробиджан;

район IV – побережье Балтийского моря, восточное побережье Каспийского моря, район г. Караганды, Северный Урал, район Обской губы, побережье нижнего течения р. Лены;

район V – северное побережье Кольского полуострова, побережье вблизи г. Новороссийска, Махачкалы, Дербента, Баку, Прикавказье (г. Ставрополь), полуостров Ямал, район г. Кокчетавы, побережье Охотского моря, Приморский край;

район VI – полуостров Таймыр, устье р. Лены, побережье Карского моря;

район VII – Земля Франца Иосифа, остров Новая Земля, побережье залива Шелихова (Охотское море) и Берингова моря, восточный берег и юг Камчатки, юг и север острова Сахалин, северо-западное побережье Японского моря.

Таблица 30

Нормативный скоростной напор ветра для разных географических районов

Скорость ветра. Скоростной напор.	Географические районы						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
V, м/с	21	24	27	30	34	37	40
$\frac{1}{2}\rho V^2, \text{Па}$	270	350	450	550	700	850	1000

Нормативный скоростной напор необходимо учитывать в гражданском и промышленном строительстве. Здания должны быть рассчитаны и построены так, чтобы они были устойчивыми по отношению к возможным ветрам.

Защита населения от ураганных ветров включает в себя укрытие в существующих защитных сооружениях: убежищах, подвальных помещениях, погребах, подпольях. При тайфунах в связи с возможностью штормовых приливов, крупных штормовых волн и наводнений основным способом защиты населения часто является его эвакуация из прибрежных районов.

6.6. Пыльные бури. Снежные метели

Пыльная буря – сильный продолжительный ветер, несущий в виде аэрозвеси большое количество пыли, песка. Пыльные бури возникают обычно в теплое время года (весной, летом, осенью) в пустынях, полупустынях и распаханных степях при пересыхании почвы, в условиях слабого развития растительности или ее отсутствия. При пересыхании и иссушении почвы происходит ее растрескивание с образованием большого числа мелких и мельчайших частиц пыли размером $10^{-1} \dots 10^{-4}$ мм. Могут быть и более крупные частицы. Перенос пыли начинается уже при скорости ветра 4...5 м/с и усиливается с возрастанием скорости воздушного потока. Перенос пыли, песка происходит преимущественно в нижних слоях атмосферы, хотя мельчайшие пылинки могут подниматься до высоты 5...7 км. Пыльная буря развивается при скорости ветра ~20 м/с. Такой ветер в условиях засушливой погоды может снести поверхностный культурный слой почвы (нередко вместе с посевами) на значительной территории, перенести миллионы тонн пыли на расстояние до нескольких сотен и тысяч километров. Пыльные бури наносят огромные убытки сельскому хозяйству, уничтожая плодородный поверхностный слой почвы в одних районах и засыпая посевы в других, вызывая песчаные заносы на железнодорожных путях, образуя песчаные и пылевые отложения на шоссе и дорогах, улицах городов и поселков.

При скорости ветра 20...30 м/с и влажности воздуха 10 %...15 % наблюдаются «черные бури», несущие еще большее количество пыли, в связи с чем прозрачность воздуха резко уменьшается. При этом дальность видимости составляет менее 50...100 м, а дневная освещенность ослабевает настолько, что приходится зажигать свет. Как отмечалось в п. 6.1, черная буря на юге Украины в 1928 г. захватила территорию свыше 1 млн. км². Ветер поднял в воздух более 15 млн. тонн чернозема; высота пыльных облаков достигала 700...800 м. Эта масса пыли была перенесена на запад и осела в Прикарпатье и Румынии, а толщина черноземного слоя в пострадавших районах Украины уменьшилась примерно на 10 см [48].

Возникновению пыльных бурь способствует отсутствие растительности на больших площадях, бесструктурность и рыхлость почв, нерациональная распашка земель. Пыльные бури наблюдаются в США, Китае, Египте, СНГ (на юге Украины, в равнинных районах Казахстана и Средней Азии) и некоторых других странах.

Борьба с пыльными бурями проводится с помощью лесонасаждений и лесозащитных полос, закрепления песков растительностью, снего- и водозадержания и других агротехнических мероприятий.

Вместе с зимой приходят снежные метели. Они оставляют после себя засыпанные снегом дороги, перегороженные сугробами улицы, поваленные столбы. Сильные ветры могут полностью снести снежный покров с полей, тем самым обрекая их на вымерзание.

Характер и развитие метели зависят от скорости ветра, структуры снежного покрова [12].

При скорости ветра 6...8 м/с над поверхностью снега появляются тонкие непрерывно меняющиеся снежные струйки. Их высота до 20...30 см. Это поземок – самая слабая метель.

При скорости ветра 10..15 м/с снег поднимается до высоты в несколько метров – начинается так называемая низовая метель. При скорости ветра ~20 м/с и более снежные массы поднимаются до высот, измеряемых десятками метров. Следует отметить, что низовая метель развивается в отсутствие снегопада. Можно указать несколько районов на территории нашей страны, где низовые метели наблюдаются довольно часто и достигают большой силы, – степи Поволжья, Западная и Восточная Сибирь, север Казахстана. Особенно сильные низовые метели свирепствуют (и притом почти круглый год) в Антарктиде, где скорость ветра достигает 60 м/с и более.

Кроме скорости ветра на формирование низовой метели определенное влияние оказывает состояние снежного покрова. Нужно, чтобы поверхностный слой был относительно сухим и не слишком уплотненным (ветру трудно поднимать в воздух мокрый снег, разрушать плотную поверхностную корку). Эти условия чаще всего и выполняются в названных районах с их относительно сухим континентальным климатом, с холодными зимами, с редкими зимними оттепелями.

Особенно сильные снежные заносы образуются во время общей метели, когда одновременно имеют место сильный ветер и сильный снегопад. В этом случае в приземных слоях воздуха перемещается снег, падающий сверху, и снег, поднятый ветром с поверхности земли. Сильные снегопады, как правило, происходят при повышенной влажности воздуха. Общие метели характерны для приморских районов. Они наблюдаются на побережьях США, Канады, с ними знакомы жители нашего Дальнего Востока, Сахалина, Камчатки. Большие массы выпадающего при таких метелях снега представляют

опасность для транспорта, систем связи и даже зданий (могут не выдержать крыши).

6.7. Грозы. Защита от молний

Гроза – наиболее распространенное опасное атмосферное явление. При грозе выпадает большое количество осадков, однако наибольшую опасность представляют электрические разряды – молнии. Удары молний нередко вызывают пожары, разрушают здания, портят линии электропередачи, нарушают движение электропоездов, могут поразить людей и животных. Молния – гигантский электрический разряд длиной до нескольких километров и продолжительностью в десятые доли секунды, сопровождаемый яркой вспышкой света и громом. Электрическая природа молний была раскрыта американским физиком В. Франклином.

Когда образуется мощное кучево-дождевое облако с крупными водяными каплями, сильные турбулентные восходящие потоки воздуха начинают дробить эти капли. Отделившиеся наружные частички капель несут в себе отрицательный заряд, а оставшиеся ядра капель оказываются заряженными положительно. Средняя продолжительность одного грозового цикла составляет примерно 30 минут, а электрический заряд вспышки молнии может достигать до 80 Кл и образовываться на участке грозового облака радиусом до нескольких километров.

Для оценки последствий от удара молнии важным является разряд между грозовым облаком и землей. На равнинной местности направление движения молнии обычно от облака к земле. Предельное напряжение пробоя, вызывающее образование ионизированного канала, составляет около $3 \cdot 10^5$ В/м. Лавинный заряд движется вниз ступенями по 50 ÷ 100 м, пока не достигнет земли (ступенчатый лидер). Когда до земной поверхности остается примерно 100 м, молния «нацеливается» на какой-либо предмет. Разряды могут иметь силу тока от нескольких единиц до 200 кА. Обычно сила тока быстро нарастает за первые 10...20 мс, в следующие 200 мс происходит медленное ее снижение до 20 % от максимальной величины [11,14].

Температура в ионизированном канале может достигать 20000 К. Внезапный нагрев воздуха в этом канале приводит к его мгновенному расширению и затем сжатию от охлаждения – происходит своего рода взрыв, сопровождаемый раскатами грома.

Обычно, ступенчатый лидер переносит отрицательный заряд. Иногда он переносит положительный заряд; при этом время нарастания, а затем уменьшения тока более продолжительно. Отмечено максимальное значение заряда ~ 200 Кл. и силы тока 218 кА соответственно [11].

Следует отметить, что в горах ступенчатые лидеры могут зарождаться на вершинах гор и двигаться от вершины вверх.

Поражение, наносимое молниями, обусловлено высоким напряжением, большой силой тока в канале молнии и высокой температурой. Сильный ток, прошедший через тело человека от удара молнии, вызывает остановку сердца (сопротивление тела человека от головы до ног составляет ~ 500 Ом).

Оценка опасности воздействия молний основана на статистике частоты гроз с опасными молниями в данном конкретном районе. Повторяемость опасных молний относят к единице площади, что дает возможность получить величину риска по соотношению, аналогичному (2.40).

Молнии играют и положительную роль. Установлено, что ежегодно в результате грозových разрядов в атмосфере образуется около 100 млн. тонн связанных соединений азота, которые вместе с дождями поступают в почву, что существенно улучшает плодородие земли [1].

Остановимся отдельно на время от времени наблюдаемом загадочном природном явлении, связанном с атмосферным электричеством – шаровой молнии. Природа такого явления до конца не установлена. Это круглое светящееся образование. Диаметр шаровых молний находится в диапазоне от долей сантиметра до нескольких метров. Яркость света молнии сравнивают с яркостью света 100-ватной электрической лампочки. Чаще всего, примерно в 60 % случаев, она имеет желтый, оранжевый или красноватый цвет; в 20 % случаев – это белый шар; в 20 % случаев – синий или голубой. Наличие четкой границы говорит о том, что вещество молнии находится в особом фазовом состоянии. В отдельных случаях на поверхности пляшут язычки пламени, выбрасываются снопы искр. Обычно шаровая молния движется бесшумно; но может издавать шипение или жужжание – особенно, когда она искрит. Шаровая молния чутко реагирует на электрическое поле вблизи поверхности земли. Так, например, она стремится переместиться в те области пространства, где напряженность поля меньше; этим можно объяснить частое ее появление внутри помещений.

Шаровая молния обычно обходит груды металла, огибает наблюдателя, копирует в своем движении рельеф местности – во всех этих случаях она движется вдоль эквипотенциальной поверхности. Во время грозы земля и объекты на ней заряжаются положительно. Значит, шаровая молния тоже заряжена положительно. С течением времени заряд молнии может измениться, и тогда меняется и характер ее движения.

Шаровая молния способна проникать в помещения сквозь щели и отверстия, размеры которых много меньше размеров самой молнии. Так, молния диаметром 40 см может пройти сквозь отверстие диаметром всего в несколько мм.

Живет шаровая молния от 10 с до 1 мин. Наиболее долго живут молнии диаметром 10...40 см. Известны три способа прекращения ее существования. Чаще всего, в 55 % случаев, молния взрывается; в 30 % случаев спокойно угасает (из-за нехватки запасенной в ней энергии); в 15 % случаев внутри молнии развиваются неустойчивости и она распадается на части, которые быстро угасают («сгорают»).

Согласно одной из гипотез шаровая молния возникает под воздействием разряда обычной линейной молнии, когда в воздушной среде происходят ионизация и диссоциация некоторого объема воздуха. Оба эти процесса сопровождаются поглощением энергии. Сгусток заряженного электрической энергией воздуха постепенно отдает запасенную энергию свободным электронам окружающего слоя воздуха. Если шар свою энергию отдает на свечение, то он просто исчезает – превращается снова в обыкновенный воздух. Когда же он на своем пути встречает какие-либо вещества, действующие как возбудители, то взрывается. Такими возбудителями могут быть окиси азота и углерода в виде испарений, пыли, сажи и т.д. Несомненно, исследования по объяснению природы шаровой молнии должны быть продолжены.

Энергия шаровой молнии в зависимости от ее размеров составляет от нескольких килоджоулей до нескольких сот килоджоулей, а плотность энергии примерно $1...10 \text{ Дж/см}^3$ [11,14]. Известны отдельные случаи гибели людей от шаровых молний, хотя чаще всего она обходит человека стороной. Страх перед такой молнией основан на невозможности предвидеть, как она поведет себя через секунду, две, три.

Как показывает практика, более опасна обыкновенная линейная молния. Защита зданий и сооружений от молний состоит в безопасном заземлении электрических импульсов, то есть в применении

громоотводов. Считают, что громоотвод притягивает приближающегося ступенчатого лидера, образуя защитный конус с углом 90° ниже верхушки громоотвода. С целью большей наглядности, ударное расстояние h для ударов молнии от головной части лидера к точке заземления представляют как функцию от высоты грозового облака H и величины заряда Q . Удар происходит, если напряженность поля между головой лидера и заземленной точкой превысит пробивное напряжение поля, равное в воздухе ~ 3 кВ/см.

Практический интерес представляет зависимость h от максимальной силы тока J . При средней продолжительности разряда молнии 0,1 с величину J оценивают по соотношению [11,14]

$$J = 2 \cdot 10^4 Q, \quad (6.6)$$

где J – сила тока, А; Q – заряд, Кл.

Значения ударного расстояния h представлены на рис. 42. Данные этого рисунка могут быть использованы при проектировании защиты от молний, позволяя установить зону, в которой молния с определенной величиной разряда будет притянута.

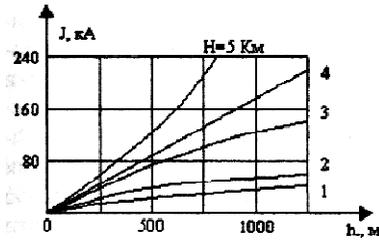


Рис. 42. Ударное расстояние для молнии

Для защиты человека от молний на открытом месте нельзя становиться под высокими деревьями, особенно одиноко стоящими, так как молния часто ударяет в них. Очень опасен в этом отношении дуб, потому что его корни глубоко уходят в грунт. Такое дерево действует как громоотвод, и существует опасность возникновения короткого замыкания между деревом и человеком, так как сопротивление у дерева больше, чем у человека. Никогда не нужно укрываться в стогах сена и кладках снопов (скирдах). В поле, особенно на возвышенных местах, при сильной грозе идущий человек подвергается большой опасности

поражения молнией. В таких случаях рекомендуется сесть на землю и переждать грозу.

Грозу лучше всего переждать в защищенном помещении. Перед началом грозы необходимо уничтожить сквозняки в помещении и закрыть все дымоходы.

Если случится несчастье – кто-либо будет контужен молнией, необходимо немедленно оказать пострадавшему первую медицинскую помощь (искусственное дыхание). Следует отметить, кое-где существует предрассудок, что пораженному молнией можно помочь, закопав его тело в землю. Этого ни в коем случае нельзя делать: человек, пострадавший от молнии, особенно нуждается в усиленном притоке воздуха к телу.

Пример. Определить ударное расстояние для молнии, если электрический заряд лидера составляет 5 Кл, высота грозового облака 3 км.

Решение: 1. По формуле (6.6) находим силу тока

$$J = 2 \cdot 10^4 \cdot 5 = 10^5 \text{ A} = 100 \text{ кА.}$$

2. По графику (рис. 42) для значений $H = 3 \text{ км}$, $J = 100 \text{ кА}$ снимаем величину искомого расстояния: $h = 750 \text{ м}$.

6.8. Парниковый эффект. Потепление климата

Парниковый эффект – свойство атмосферы пропускать солнечную радиацию, но задерживать земное излучение, и тем самым способствовать аккумуляции тепла Земли.

Лучистый перенос тепла в атмосфере осуществляется видимым и инфракрасным излучением. Молекулы основных газов, образующих постоянную составную часть атмосферы (азота, кислорода, аргона) практически не поглощают этих видов излучения. Поглощательные свойства атмосферы определяются ее переменной частью: водяным паром, углекислым газом, озоном, а также взвешенными в воздухе каплями воды и кристаллами льда. Молекулы газов, образующих переменную часть атмосферы, слабо поглощают коротковолновое солнечное излучение, которое затем почти полностью поглощается земной поверхностью, так как альбедо, то есть отражающая способность этой поверхности, в общем мало. Нагреваясь за счет поглощения солнечной радиации, земная поверхность становится источником земного, в основном, длинноволнового излучения, которое

поглощается и одновременно излучается переменной частью атмосферы. Часть излучения, направленная к земле, создает противоизлучение атмосферы. Оно является основной причиной обогревающего действия атмосферы. Даже в ясные ночи противоизлучение атмосферы составляет более 70 % величины излучения земной поверхности, а в пасмурные ночи оно достигает 100%. Дневное противоизлучение подобно ночному. Противоизлучение уменьшает потери лучистого тепла Земли в среднем до 80 %, в результате потери составляют не более 20 % излучения Земли. Установлено, что если бы наша планета была лишена атмосферы, то при прочих равных условиях средняя температура ее поверхности составляла бы -3° . В действительности температура $t_{\text{ср}} \approx 15^{\circ}$. Таким образом парниковый эффект повышает температуру на Земле [49].

В последние десятилетия индустриальная деятельность человека привела к возрастанию содержащегося в воздушной среде углекислого газа, промышленных газов и аэрозольных примесей. Это влияет на поглощение радиации в атмосфере и тем самым на температуру воздуха. Изменения температуры уже заметны в больших городах. В масштабе планеты они еще незначительны, хотя отдельные нарушения климатических процессов уже наблюдаются: экстремальные осадки в Западной Европе и ураганные ветры, теплые и влажные аномалии на Дальнем Востоке и др. В ближайшем будущем можно ожидать их значительное возрастание. По выводам М.И. Будыко, даже небольшое повышение средней температуры земной поверхности и атмосферы может привести к уменьшению полярных оледенений, а проистекающее отсюда изменение отражающей способности Земли – к дальнейшему потеплению и сокращению льдов до их полного исчезновения. Одновременно произойдет подъем уровня воды Мирового океана, что приведет к затоплению значительных территорий [49].

Пример. Оценить подъем уровня океана, если в результате потепления климата растают льды Гренландии и Антарктиды. Площадь поверхности Земли $\sim 510 \cdot 10^6 \text{ км}^2$, поверхность суши – $148,6 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Площадь Гренландии – $2,176 \cdot 10^6 \text{ км}^2$, Антарктиды – $13,975 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Объем льда Гренландии – $2,6 \cdot 10^6 \text{ км}^3$, Антарктиды – $24 \cdot 10^6 \text{ км}^3$. При проведении расчетов изменение площади Мирового океана вследствие затопления части территории суши допускается не учитывать.

Решение: 1. Определяем площадь Мирового океана:

$$S = 510 \cdot 10^6 - 148,6 \cdot 10^6 = 361,4 \cdot 10^6 \text{ км}^2.$$

2. Находим суммарный объем льда в Гренландии и Антарктиде:

$$V = 2,6 \cdot 10^6 + 24 \cdot 10^6 = 26,6 \cdot 10^6 \text{ км}^3.$$

3. Вычисляем подъем уровня Мирового океана (без учета затопления части суши):

$$\Delta H = V:S = 26,6 \cdot 10^6 : 361,4 \cdot 10^6 = 0,073 \text{ км} = 73 \text{ м}.$$

С учетом затопления части суши подъем уровня воды будет меньше и может составить ~60 м.

Известны и другие оценки. Согласно данным [50], несмотря на отмеченное повышение температуры воздуха, глобальное потепление климата вследствие антропогенного воздействия на атмосферу, способное полностью растопить льды Гренландии и Антарктиды, более чем проблематично. Антропогенное воздействие на атмосферу оценивается величиной $\sim 240 \cdot 10^6$ т CO_2 , что почти на четыре порядка меньше содержания природного CO_2 в атмосфере ($\sim 700 \cdot 10^9$ т). Выбросы значительных количеств CO_2 , CO , SO_2 , NO_2 , паров воды в атмосферу наблюдались и прежде, например, при извержении вулканов Томборо в 1815 г. и Кракатау в 1883 г., однако таяния льдов не происходило.

В истории Земли периоды ледниковых эпох (например, эпохи четверичного периода) чередовались с периодами глобальных потеплений. Ледниковые эпохи характеризовались распространением в северном полушарии ледового покрова, достигающего до 50° северной широты. В период глобальных потеплений (например, в начале кембрия) Мировой океан наступал на сушу и почти затопил территорию северного полушария. В меловой период, 65 млн. лет назад, из-за высокой температуры планета потеряла практически весь свой ледовый покров, который восстановился 15 – 20 млн. лет назад. Такие глобальные изменения обусловлены глубинными процессами синхронизации Солнечной системы, изменениями параметров земной орбиты и колебаниями положения ее оси вращения [50].

Тем не менее, опасность климатических изменений в XXI веке существует. Согласно данным МЧС РФ в течение ближайших 30 лет ожидается увеличение средней температуры атмосферы на 1° , при этом произойдет подъем уровня Мирового океана на 0,2 м. Уже такое небольшое изменение температуры атмосферы и уровня океана может привести к климатическим изменениям в отдельных районах [51]. По данным Главной геофизической обсерватории имени Воейкова (Росгидромет) в течении XXI века ожидается подъем Мирового океана на 0,49 м [51].

Подъем уровня воды на несколько метров – настоящая катастрофа для ряда островных государств, таких как Индонезия, Япония, Англия. Но не только для них. Под угрозой окажутся прибрежные районы северо-западной Европы, Канады, Китая и др. А здесь проживает значительная часть населения Земли. Таким образом, отмеченное потепление может привести к тяжелым последствиям.

Как отмечалось, указанное потепление атмосферы связано с выбросами CO_2 в воздушную среду в результате использования значительных количеств углеводородного топлива в автомобильном транспорте, энергетике, промышленности. Следовательно, нужна научно-обоснованная программа постепенного перехода на альтернативные виды топлива и энергосберегающие технологии. Нужно объединить усилия всех людей, чтобы возможной катастрофы не произошло.

Глава 7. ЛАНДШАФТНЫЕ ПОЖАРЫ

7.1. Опасность ландшафтных пожаров

Ландшафтные пожары – это лесные, торфяные, степные, полевые (созревшие хлеба) пожары. Пожары представляют собой опасное стихийное бедствие, т.к. в огне пожаров уничтожаются большие материальные ценности: лес, хлеб, торф, сгорают постройки, гибнут животные, птицы. Ландшафтные пожары обладают серьезными поражающими факторами, основные из которых – высокая температура, вызывающая возгорание всего, что окажется в зоне горения; тепловое излучение из этой зоны способное привести к поражению людей и возрастанию горючих материалов за ее пределами; задымление больших районов, оказывающее раздражающее и отрицательное психологическое воздействие на людей, а в некоторых случаях и отравление их окисью углерода; ограничение видимости.

Лесные и торфяные пожары – наиболее частые ландшафтные пожары [1]. Ежегодно в летнее время в отдельных лесных районах страны создаются условия, способствующие возникновению и распространению таких пожаров. Количество пожаров и поражаемая ими площадь изменяются в широких пределах. Так, в 1915 г. в Западной Сибири пожарами была охвачена площадь лесов $\sim 14 \cdot 10^6$ га. Дымовое облако над Сибирью простиралось над территорией, равной по площади всей Западной Европе. На территории нашей страны ежегодно возникают 10...30 тысяч лесных пожаров, охватывающих общую площадь от $0,5 \cdot 10^6$ га до $2 \cdot 10^6$ га.

Крупные пожары были в 1972 г. и в 1984 г. Пожары наносят огромный ущерб народному хозяйству и представляют угрозу для людей, населенных пунктов, промышленных и других объектов, расположенных в лесу. Например: в 1989 г. – 1992 гг. за три года огонь прошел более $4,8 \cdot 10^6$ га лесов, что нанесло ущерб более $40 \cdot 10^9$ руб. (в ценах 1992 г.).

Основные причины пожаров в лесах нашей страны (по данным [1]):

– от молний	8,1 %
– по вине местного населения	60 %
– по вине организаций и экспедиций	19,7 %
– по вине лесозаготовителей	3,5 %
– от сельскохозяйственных палов	6,7 %
– по другим причинам	2 %

Таким образом, в большом количестве случаев (~90 %) пожары в лесу происходят вследствие неосторожного обращения человека с огнем.

7.2. Некоторые сведения о горении. Горючие материалы в лесу

Пожар – это неконтролируемый процесс горения. Принято считать, что горение – химическая реакция, сопровождающаяся выделением тепла и света [52]. С этой точки зрения вещества могут «гореть» не только в кислороде. Например, некоторые металлы «горят» в хлоре, окислы натрия и бария «горят» в углекислом газе. Тем не менее, в общепринятом понимании горение – это быстро протекающая реакция соединения горючего вещества с кислородом воздуха, сопровождающаяся выделением тепла и излучением света. Таким образом, горение есть не что иное, как окислительная реакция, сопровождающаяся образованием новых веществ и выделением избыточной теплоты, накопленной в молекулах горючего вещества.

Следует отметить, что горение различных горючих материалов может начаться либо в результате воспламенения от внешнего источника тепла, либо при самовоспламенении.

Температура самовоспламенения для различных веществ различна. Например, для торфа она составляет ~420°. Причиной самовоспламенения торфа являются биологические и химические процессы, возникающие при определенной влажности и относительно низкой температуре. Способностью к самовозгоранию на открытом воздухе обладают также сено, опилки, подстилка, листья, собранные в большие кучи и имеющие определенную влажность.

Однако лесные пожары, как отмечалось выше, чаще возникают при неосторожном обращении с огнем. Воспламенение (зажигание) отличается от самовоспламенения тем, что при воспламенении часть горючего вещества нагревается тепловым источником, привнесенным извне, тогда как при самовоспламенении повышение температуры происходит за счет внутренней энергии самого горючего вещества. Эти понятия важны при понимании причин возникновения лесных пожаров [54].

Как отмечалось, при горении выделяется большое количество тепла.

Теплотой сгорания вещества называется количество теплоты, которое выделяется при сгорании единицы массы (1 кг) вещества в атмосфере кислорода.

Пусть, например, требуется определить теплоту сгорания горючего вещества $C_aH_bO_cN_d$, где индексы a, b, c, d обозначают количество атомов углерода, водорода, кислорода, азота в молекуле этого вещества, по известной формуле его сгорания в атмосфере кислорода [55]:



где $C_aH_bO_cN_d$ – горючее вещество; O_2 – окислитель; CO_2, H_2O, N_2 – продукты сгорания; Q_{cr} – теплота сгорания.

Для определения теплоты сгорания Q_{cr} необходимо знать энергию образования веществ $C_aH_bO_cN_d, O_2, CO_2, H_2O, N_2$. Теплотой (энергией) образования называется тепловой эффект, получающийся при образовании одного грамм-моля данного вещества из свободных элементов в стандартных условиях, то есть при температуре $25^\circ C$ и давлении 1 атм. Существует несколько способов расчета теплоты образования. Один из наиболее распространенных способов основывается на использовании принципа аддитивности энергий связи в молекулах. Каждой связи отвечает определенная энергия, а сумма энергий связи приближенно равна энергии образования моля вещества из атомов. Теплоту образования определяют по термохимическим таблицам [56]. Следует отметить, что теплота образования простых веществ (O_2, H_2, N_2, C и др.) принимается равной нулю. Данные по теплоте образования некоторых веществ приведены в табл. 31.

Таблица 31

Теплота образования некоторых веществ

Вещество	Хим. формула	Теплота образования, ккал/моль
Углекислый газ	CO_2	94,03
Окись углерода	O	26,4
Вода (жидкость)	H_2O	68,32
Вода (газ)	H_2O	57,8
Метан	CH_4	17,89
Метиловый спирт	CH_3OH	48,08
Этиловый спирт	C_2H_5OH	56,24
Простые вещества	O_2, H_2, N_2, C	0

П р и м е ч а н и е. В табл. 31 и ниже под молем подразумевается такое количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна его молекулярному весу.

По закону Г.Г. Гесса теплота сгорания $Q_{\text{сг}}$ в соотношении (7.1) определяется как разность между суммой теплот образования продуктов сгорания и теплотой образования исходного горючего вещества [55].

Пример. Определить теплоту сгорания углерода (С).

Решение: 1. По формуле (7.1) составляем реакцию горения углерода:



2. По табл. 31 находим теплоту образования углекислого газа и углерода: $Q_{\text{со}} = 94,03$ ккал/моль; $Q_{\text{с}} = 0$.

3. Определяем теплоту сгорания углерода как разность между теплотой образования продуктов сгорания и теплотой образования горючего вещества:

$$Q_{\text{сг}} = 1 + 94,03 \text{ ккал/моль} - 1 = 94,03 \text{ ккал/моль} = (94,03 \cdot 1000)/12 = 7840 \text{ ккал/кг} = 32,8 \text{ МДж/кг}.$$

Основным горючим материалом в лесу является древесина. Она состоит из клетчатки ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) и лигнина – сложного органического вещества. В ее состав входят также различные смолы и эфирные масла. Теплоту сгорания древесины и других лесных горючих материалов определяют экспериментально с помощью калориферных установок. В лесу деревья, кустарник, мхи, как правило, содержат много влаги. При сгорании влажного топлива часть тепла затрачивается на испарение воды, содержащейся в нем, поэтому теплота сгорания будет меньше, чем при горении сухой древесины. Такую теплотворную способность топлива называют низшей. Высшая теплотворная способность больше низшей на величину теплоты испарения влаги. Значения высшей и низшей теплотворных способности лесных горючих материалов даны в табл. 32 [53].

Таблица 32

Теплотворная способность некоторых лесных горючих материалов

Лесной материал	Теплота сгорания Q , ккал/кг		
	Высшая	Низшая (в числителе) при влажности, % (в знаменателе)	
1	2	3	4
Сосна (хвоя молодая)	5190	3160/54	1330/200
Сосняк багульниковый: древесина хвоя	4930	2140/102	1460/168
	5530	-	-
Ель: древесина хвоя	4800	2630/67	1890/117
	4930	2610/67	1630/150

1	2	3	4
Береза: древесина	4800	2690/64	1070/223
кора	5480	-	-
Опад (в основном мертвая сосновая хвоя и кора)	5780		-
Мох	4760	4410/7	3230/-
Торф	5030	3150/50	420/450

Древесина содержит около 42 % собственного кислорода. Предварительное окисление делает углеводородную молекулу непрочной. Такая молекула может распадаться при относительно низких температурах подогрева. В процессе распада она выделяет летучие вещества, которые при смешивании с воздухом начинают гореть пламенем. Поэтому древесина относится к сравнительно легко загораемым материалам.

На рис. 43 изображена схема процесса горения древесины от подогрева до угольной фазы.

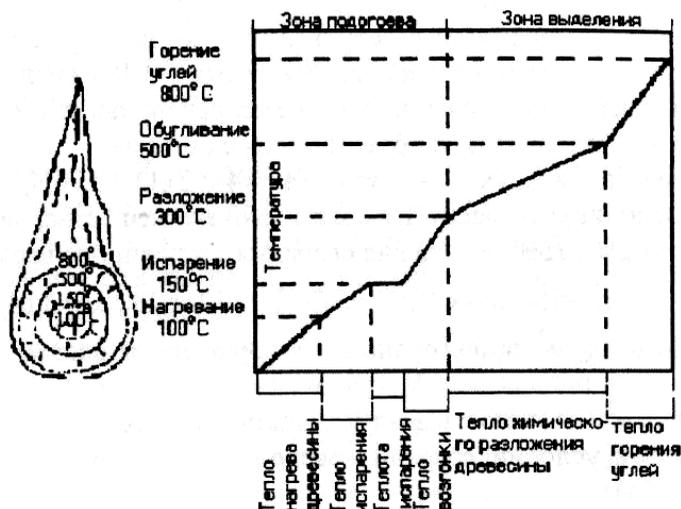


Рис. 43. Схема процесса горения древесины

В зависимости от повышения температуры установлены следующие стадии горения:

- при $0^\circ < t < 100^\circ$ – процесс нагревания;
- при $100^\circ < t < 150^\circ$ – испарение влаги;

при $150^\circ < t < 300^\circ$ – нарастающий процесс разложения древесины с выделением горючих газов;

при $320^\circ < t < 500^\circ$ – постепенное замедление процесса разложения внутри обугленной частицы;

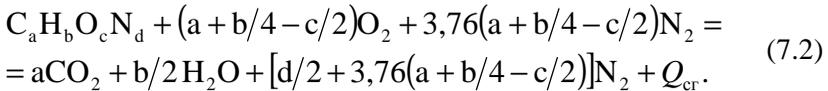
при $500^\circ < t < 1000^\circ$ – горение углей с выделением CO и CO₂.

По мере удаления из частиц летучих веществ светящееся пламя начинает спадать и, наконец, исчезает совсем. Таким образом, древесина не горит с поверхности, а разлагается с нее. Горит топливный газ. В конце процесса горения остаются углеродные частицы, окруженные полупрозрачным синеватым пламенем окиси углерода воздуха. В результате интенсивного окисления кислородом воздуха углеродные частицы быстро сгорают и превращаются в золу.

Важной характеристикой процесса горения различных веществ является расход воздуха, обеспечивающий горение.

Объем воздуха V_0 (м³), необходимый для сжигания 1 кг горючего вещества можно оценить следующим образом.

Если горючее вещество определяется формулой $C_aH_bO_cN_d$, количество воздуха, обеспечивающее сгорание 1 кмоль вещества при нормальных условиях (давление 1 атм, температура 0 °С), находится по уравнению



Уравнение (7.2) отличается от уравнения (7.1) слагаемым $3,76(a + b/4 - c/2)N_2$, включенным в левую и правую части уравнения с учетом состава воздуха: 21 % кислорода, 79 % азота (~21 % кислорода, ~78% азота и ~0,9 аргона; в приближенных расчетах аргон, как инертный газ, самостоятельно не учитывается, а объединяется с азотом).

Искомая масса воздуха – это $(a + b/4 - c/2)(O_2 + 3,76N_2)$. Разделив полученную величину на массу 1 кмоль горючего вещества, можно найти массу воздуха m_0 , кг, требуемого для сгорания 1 кг данного вещества:

$$m_0 = [(a + b/4 - c/2)(O_2 + 3,76)] / (a \cdot 12 + b \cdot 2 - c \cdot 16 + d \cdot 14) \quad (7.3)$$

Расход воздуха V_0 , м³, при сгорании 1 кг горючего вещества

$$V_0 = \frac{m_0}{\rho_0}, \quad (7.4)$$

где $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при нормальных условиях.

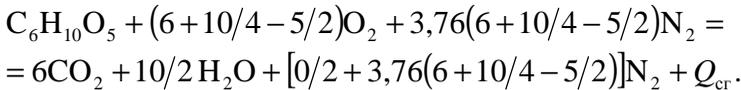
При изменении условий сгорания расход воздуха пересчитывается по соотношению [54]

$$V_{\text{в}} = V_0 \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0}, \quad (7.5)$$

где P, T – давление и температура воздуха при заданных условиях; $P_0 = 101300 \text{ Па}$, $T_0 = 273 \text{ К}$.

Пример. Определить расход воздуха, при сжигании 1 кг клетчатки ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$), являющейся основой древесины (температура воздуха $15 \text{ }^\circ\text{C}$, давление $101,3 \text{ Па}$).

Решение: 1. На основе уравнения (7.2) составляем реакцию горения клетчатки, принимая значение $a = 6$, $b = 10$, $c = 5$. $d = 0$:



Количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кмоль клетчатки, составляет

$$(6 + 10/4 - 5/2) \cdot 16 \cdot 2 + 3,76 (6 + 10/4 - 5/2) \cdot 14 \cdot 2 = 823,7 \text{ кг.}$$

2. Находим массу воздуха, требуемого для сжигания 1 кг клетчатки:

$$m_0 = 823,7 / (6 \cdot 12 + 10 \cdot 1 + 5 \cdot 16 + 0 \cdot 14) = 5,08 \text{ кг.}$$

3. По соотношению (7.4) вычисляем расход воздуха при нормальных условиях ($P_0 = 101300 \text{ Па}$, $T_0 = 273 \text{ К}$):

$$V_0 = 5,08 / 1,29 = 3,95 \text{ м}^3.$$

4. По соотношению (7.5) определяем искомый расход воздуха:

$$V_{\text{в}} = V_0 \cdot 101300 \cdot (273 + 15) / (101300 \cdot 273) = 4,16 \text{ м}^3.$$

Данный результат близок к справочным данным [54], согласно которым $V_{\text{в}} = 4,18^3$.

Определение объема воздуха V_v имеет большое практическое значение при разработке способов тушения пожаров, основанных на вытеснении из зоны горения кислорода воздуха.

7.3. Лесные и торфяные пожары

Различают пожары: низовой, верховой, подземный. По скорости распространения низовой и верховой подразделяются на устойчивый и беглый [54].

Низовой пожар. При устойчивом низовом пожаре происходит горение почвенного покрова, пней, валежа. В огне сгорают подрост и подлесок; повреждаются нижние части стволов и корни, выступающие на поверхность земли. Такие пожары типичны для второй половины лета и наблюдаются в основном в черничниках и долгомошниках.

Беглый низовой пожар характеризуется быстрым продвижением кромки огня, когда сгорают сухая трава, лишайники, опад. Он наблюдается весной преимущественно в травянистых лесах.

Следует отметить, что почти любой пожар в лесу вначале своего развития имеет вид низового и при соответствующих условиях может перейти в верховой или подземный.

Верховой пожар – это когда горят кроны деревьев. При устойчивом верховом пожаре верхние и нижние ярусы леса горят одновременно. Огонь движется сплошной стеной. Является наиболее разрушительным видом пожара. Наблюдается при безветренной погоде после засухи во второй половине лета. Характерен для средневозрастных сосновых и лиственных лесов.

При беглом верховом пожаре пламя по пологу леса распространяется уступами, вытянутыми по направлению ветра. За 8...10 с пламя проходит расстояние 100...120 м, затем его движение замедляется и несколько минут горит верхний ярус (полог), а затем загорается и нижний ярус (напочвенный покров). Горение нижнего яруса усиливается за счет падающих горящих веточек и хвои. Через некоторое время кромка низового пожара опережает кромку верхового. Низовой пожар при этом подогревает очередной участок полога насаждений. При порыве ветра пламя верхового пожара вновь скачком продвигается вперед. Такие пожары характерны летом в чистых сосновых лесах с куртинами хвойного подроста. Устойчивые верховые пожары наблюдаются при скорости ветра $V < 5$ м/с, беглые – при $V > 5$ м/с.

Для *подземных пожаров* характерным является уничтожение органической части почвы. Они наблюдаются на торфянистых почвах после продолжительного засушливого периода, поэтому их часто называют *торфяными пожарами*. При загорании верхнего напочвенного покрова огонь заглубляется в торфянистый горизонт почвы, выжигая ямы в виде воронок, а затем начинает распространяться в горизонтальном направлении (рис. 44).

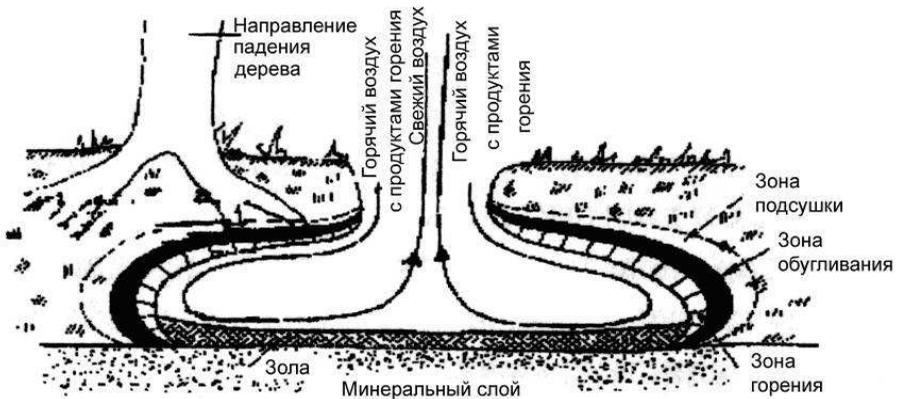


Рис. 44. Схема торфяного пожара

Поскольку при таком пожаре сгорает корнеобитаемый слой почв, деревья, лишенные опоры корней, падают (обычно вершиной на выгоревшую площадь). Особую опасность представляет в ряде случаев скрытый характер такого пожара, если торфянистый слой покрыт другим (несгораемым) слоем почвы. Очаг пожара становится невидимым. Могут быть неожиданные провалы почвы.

7.4. Пожарная опасность в лесу. Распространение пожаров

Возникновение и развитие лесных пожаров существенно зависят от состояния погоды. Показатель горимости лесных материалов в зависимости от величины осадков определяется по соотношению [1]

$$\Gamma_n = K[\Gamma_{n-1} + T(T - T_0)], \quad (7.6)$$

где Γ_n – показатель горимости лесных материалов текущего дня; Γ_{n-1} – показатель горимости лесных материалов предшествующего дня; T – температура воздуха в 7 часов утра ($^{\circ}\text{C}$); T_0 – температура точки росы на это же время; K – коэффициент, зависящий от величины суммы осадков, измеренных на метеостанции в 19 часов предшествующего дня и в 7 часов текущего дня (табл. 33).

Таблица 33

Значения коэффициента K

Осадки (мм)	0	0,1...0,9	1...2	3...5	6...14	14...19	20
K	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0

В зависимости от величины показателя горимости лесных материалов установлены следующие классы пожарной опасности по условиям погоды:

- 1 – опасность пожара отсутствует ($\Gamma_n = 300...1000$);
- 2 – средняя пожарная опасность ($\Gamma_n = 1001...4000$);
- 3 – высокая пожарная опасность ($\Gamma_n = 4001...10000 \div 42000$);
- 4 – чрезвычайно высокая пожарная опасность ($\Gamma_n > 10000 \div 12000$).

Скорость распространения основных элементов пожара (фронта, фланга и тыла) в зависимости от скорости ветра и характера горючих материалов определяется по формулам [54]:

$$\begin{aligned}
 \text{фронтальной кромки: } V_{\text{фр}} &= (V_0 + AV_{\text{в}}) \left[1 + V_{\text{в}} / (V_{\text{в}}^2 + B^2)^{0,5} \right]^2; \\
 \text{тыловой кромки: } V_{\text{т}} &= (V_0 + AV_{\text{в}}) \left[1 - V_{\text{в}} / (V_{\text{в}}^2 + B^2)^{0,5} \right]^2; \\
 \text{фланговой кромки: } V_{\text{фл}} &= V_0 + AV_{\text{в}},
 \end{aligned} \tag{7.7}$$

где $V_{\text{фр}}$, $V_{\text{т}}$, $V_{\text{фл}}$ – скорости распространения основных элементов пожара, м/мин; V_0 – скорость распространения пожара в безветренную погоду (м/мин); $V_{\text{в}}$ – скорость ветра (м/с); A , B – численные коэффициенты.

В приближенных расчетах принимают скорость $V_0 = 0,4...0,6$ м/мин при влажности топлива до 30 % и $V_0 = 0,2...0,4$ м/мин при влажности более 30%. Значения коэффициентов A , B приведены в табл. 34.

Таблица 34

Значения коэффициентов A, B

Горючий материал	Коэф-ты	При влажности гор. материалов, %		
		до 30	30...50	>50
Сухая трава, лишайники, опад хвои и листьев	A	0,45	0,27	0,16
	B	3,5	3,3	3
Зеленые мхи	A	0,2	0,1	0,05
	B	2,4	2,2	1,8

Пример. Определить скорость распространения фронта пожара, если напочвенный покров состоит из сухой травы и лишайников влажностью менее 30 % при скорости ветра $V_B = 4$ м/с.

Решение: 1. По табл. 34 находим значение коэффициентов $A = 0,45$ и $B = 3,5$.

2. По первой формуле системы (7.7) вычисляем искомую скорость фронта пожара, принимая $V_0 = 0,5$ м/мин:

$$V_{\phi} = (0,5 + 0,45 \cdot 4) \left(1 + 4 / (4^2 + 3,5^2) \right)^{0,5} = 7 \text{ м/мин.}$$

Обобщенные данные по скорости распространения лесного пожара в зависимости от класса горимости леса и класса пожарной опасности по условиям погоды приведены в табл. 35.

Таблица 35

Скорость распространения лесных пожаров

Класс горимости леса	Класс пожарной опасности погоды	Вид пожара	Скорость распространения пожара, м/час
Первый	2	Низовой	10...140
	3-4	То же	20...200
	3-4	Верховой устойчивый	80...150
	3-4	Верховой беглый	3000...6000
	3-4	Подземный (торфяной)	0,1
Второй	2-4	Низовой (весенний и осенний периоды)	120... 1200
	3-4	Подземный (торфяной)	0,1

Примечания:

1. К лесам первого класса горимости относятся чистые с примесью лиственных пород хвойные насаждения.

2. К лесам второго класса горимости относят чистые с примесью хвойных пород лиственные насаждения.

Наиболее опасными участками леса в отношении быстрого распространения огня являются леса первого класса горимости и особенно молодые хвойные насаждения.

7.5. Борьба с лесными пожарами

Применяются следующие способы борьбы с лесными пожарами [1]:

1. Захлестывание кромки низового пожара зелеными ветками, метлами, мешковиной и другими предметами, в процессе, которого горящие частицы смещаются в сторону пожара.

2. Засыпка кромки низового пожара грунтом с помощью лопат и грунтометов, в процессе которой механически сбивается пламя, охлаждаются горючие материалы и ограничивается доступ к ним воздуха.

3. Прокладка заградительных минерализованных полос и канав, чтобы остановить движение кромки пожара, с помощью фрезерных или грунтометательных машин, канавокопателей, бульдозеров или лопат. Полосы и канавы очищают от надпочвенного покрова и подстилки до минерального грунта.

4. Тушение пожаров с помощью взрывчатых веществ. Взрывным способом устраивают заградительные траншеи и рвы (канавы), чтобы ограничить распространение пожара. Применяют также захлестывание огня выброшенным грунтом и ударной волной направленного взрыва. Взрывчатые вещества закладывают в скважины, пробуренные специальными бурами, или в траншеи, в которые укладываются шнуровые заряды. После подрыва образуются заградительные рвы и канавы заданного размера. В экстренных случаях шнуровые заряды устанавливают накладным способом.

5. Тушение пожаров пуском встречного низового огня (отжига). Перед надвигающимся фронтом пожара от существующих или специально созданных опорных рубежей выжигают надпочвенный покров, создавая тем самым заградительную полосу, лишенную горючего материала. В результате пожар дальше распространяться не может.

Встречный низовой огонь может быть применен против устойчивых и беглых верховых и низовых пожаров, которые сопровождают верховые. При подходе фронта пожара к отжигаемой полосе появляется ветер, направленный в сторону пожара (встречная тяга). Этот эффект приводит к столкновению двух встречных восходящих потоков, приводящему к прекращению распространения пожара (рис. 45).



Рис. 45. Пуск встречного огня при тушении лесного пожара отжигом

Чтобы выжигание не превратилось в дополнительный пожар, отжиг начинают от существующих опорных рубежей (лесных дорог, просек, канав, широких ручьев) или специально устроенных минерализованных полос или полос, обработанных огнетушащими химикатами. Опорные полосы должны опираться на непроходимые для огня препятствия (реки, озера, широкие дороги, поля, луга, ранее горевшие площади).

6. Тушение пожаров водой с помощью пожарных машин, мотопомп, пожарных рукавов для подачи воды от ближайших водоемов, а также сброса воды с пожарных самолетов и вертолетов. Поданная в очаг горения вода охлаждает сферу горения, а также снижает содержание кислорода в воздухе в результате воздействия пара, образующегося при испарении воды. Все это способствует прекращению горения.

7. Тушение пожаров химикатами для остановки кромки пожара и создания опорных заградительных полос. Огнетушащее действие химикатов основано на охлаждении горючих материалов, прекращении доступа кислорода, замедлении окислительного процесса при горении. К числу веществ охлаждающего действия относятся водные растворы хлористого кальция, хлористого калия, хлористого натрия и другие. Для прекращения доступа воздуха к горящим материалам используют пену из пенных огнетушителей или готовят пену из эмульсий, выбрасывая ее через пожарные стволы пожарных автоцистерн.

8. Тушение пожаров искусственным вызыванием осадков путем обстрела облачного фронта зенитной артиллерией, применяющей снаряды, снаряженные специальными химическими веществами – йодистым серебром и другими, ракетами с ракетных зенитных установок, а также с самолетов.

Глава 8. ПАДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

8.1. Космос и планета Земля

Как известно, наша планета входит в состав Солнечной системы, которая в свою очередь входит в состав галактики Млечный путь. Галактика Млечный путь – огромное звездное образование, включающее в себя примерно 100 миллиардов звезд и звездных систем. Но и она лишь небольшая часть Мироздания. По современным представлениям доступная для наблюдений с помощью технических средств, имеющихся на конец второго тысячелетия, область Вселенной насчитывает примерно 10^{10} галактик. Таким образом, космос – это огромный и сложный мир [57].

В этом мире Земля движется вокруг Солнца со скоростью примерно 30 км/с и вместе с Солнцем участвует в еще более сложном движении вокруг центра галактики. Траектория движения Земли может пересекаться с траекториями движения других космических тел, при этом возможно падение таких тел на нашу планету. Падение космических тел на поверхность Земли может привести к очень тяжелым последствиям. Падение крупных метеоритов, как и столкновение с астероидом или кометой, обычно сопровождается взрывом с выделением огромной энергии, одновременно происходит исключительное по силе землетрясение.

Известно, что самая большая наблюдаемая группа астероидов образовалась в период формирования Солнечной системы из протопланетного облака более 4,5 миллиардов лет тому назад. Расчеты траекторий группы крупных (более 1 км) астероидов, пересекающих орбиту Земли, показали, что они движутся по эллиптическим орбитам с эксцентриситетами 0,2...0,85, большими полуосями до 4 а.е. (1 а.е. = 149,5 млн. км – среднее расстояние между Солнцем и Землей) и наклонами орбит до 60°. В процессе движения они пересекают орбиты и других планет Солнечной системы, иногда сближаясь с ними. Поэтому орбиты астероидов этой популяции быстро эволюционируют по сравнению с орбитами астероидов основного пояса или орбитами планет, их чрезвычайно сложно просчитать на длительный промежуток времени (более нескольких сотен лет).

Повторяемость событий: астероиды размером ≤ 1 м можно наблюдать с помощью телескопов в ближайшей окрестности Земли практически еженедельно, астероиды величиной 3...5 м появляются примерно 1 раз в 10 лет. По мнению астрономов в ближайшие 10 лет

следует ожидать падение астероида размером около 10 м; астероиды размером 50 – 100 м падают на нашу планету примерно 1 раз в 200 – 300 лет, размером в 1 км – 1 раз в 500000 лет. В далеком будущем возможно падение и более крупных тел [58].

8.2. Опасность падения космических тел

Принято считать, что скорость сближения астероидов с Землей может составлять примерно 30 км/с, а плотность их вещества варьируется в пределах от $2 \cdot 10^3$ кг/м³ до $8 \cdot 10^3$ кг/м³. Как известно, при соударении твердых тел со скоростями, превышающими 3...5 км/с, кристаллическая структура астероида или метеорита и определенного объема среды, с которой они соударяются, разрушается и происходит либо переход вещества в другое фазовое состояние (плавление или испарение), либо механическое дробление вещества с последующим разлетом, то есть происходят процессы, обладающие всеми существенными свойствами взрыва. При скоростях удара $V \geq 10$ км/с происходит процесс полного превращения в газ ударявшего тела и части среды, с которой произошло соударение [59].

При взрыве, обусловленном падением крупного космического тела, на поверхности планеты образуется: воронка – кратер (астроблема), размеры которой зависят от глубины проникания тела в грунт и мощности взрыва, сейсмовзрывные волны большой интенсивности и мощная воздушная ударная волна.

Энергия взрыва при падении такого тела может быть столь велика, что образуется астроблема огромных размеров, при этом значительные массы грунта выбрасываются в верхние слои атмосферы. Выброс грунта сопровождается сильным запылением и помутнением атмосферы, образованием окислов азота (NO, NO₂), катализирующих разрушение озонового слоя, проникновением жесткой радиации, выпадением кислотных дождей. Запыленность атмосферы при мощных взрывах может способствовать изменению климата и даже возникновению «астероидной» зимы.

Определенное представление о размерах астроблем можно получить по табл. 36.

Самый большой кратер на поверхности Земли обнаружен в Антарктиде, его диаметр составляет примерно 200 км.

Взрывные кратеры, образованные при падении космических тел

Астролема	Местонахождение	Диаметр, км	Возраст, млн. лет
Маникуаганская	Канада	65	-
Клируотерская	Канада	35	-
Ришатская	Мавритания	50	-
Янисьярвская	Эстония	15	700
Калужская	Район г. Калуги	15	400
Болтышевская	Кировоградская обл.	25	70
Ротмистровская	Кировоградская обл.	2	70
Попигайская	Бассейн р. Попигай в Сибири	100	28

Ранее в п. 1.1 отмечалось, что энерговыделение при падении на земную поверхность космического тела размером 100 м составляет $10^{17} \dots 10^{18}$ Дж, размером 1 км – $10^{20} \dots 10^{21}$ Дж, размером 10 км – $10^{23} \dots 10^{24}$ Дж. Для сравнения, энергия ядерного взрыва мощностью $q = 10^6$ т, где q – тротиловый эквивалент взрыва, составляет $4,52 \cdot 10^{15}$ Дж. Согласно данным [5] при падении космического тела размером 1 км в густонаселенном районе Земли может погибнуть значительная часть населения планеты (с учетом вторичных эффектов разрушения – поражение АЭС, ГЭС, ХОО и др.).

При падении более крупных тел последствия могут быть еще более тяжелыми и привести к гибели человеческой цивилизации.

Установлено, что за последние 600 млн. лет в истории Земли состоялось примерно 5 катастроф, в результате которых за сравнительно короткий период времени произошли значительные изменения в химическом составе океана и атмосферы, повлекшие за собой коренные изменения видового состава флоры и фауны. Вполне допустимо, что границы геологических эпох связаны с падением на нашу планету крупных космических тел [58].

Энерговыделение при падении космических тел может превышать энерговыделение при вулканических извержениях и тектонических землетрясениях на несколько порядков (см. рис. 1). На этом рисунке указаны также временные интервалы таких событий.

Следует отметить, что данные рис. 1 и в целом п. 1.1 по временным интервалам различных природных явлений могут быть использованы для оценки вероятности падения крупных космических тел на нашу планету и оценки риска таких событий.

Пример. Определить вероятность падения на земную поверхность космического тела размером 50...100 м на протяжении жизни человека 70 лет, если временный интервал между такими событиями составляет 300 лет. Оценить риск такого события.

Решение: 1. Определяем среднее число падений рассматриваемых космических тел в единицу времени 1 год:

$$\mu = 1/300 = 0,0033.$$

2. Вероятность падения космического тела вычисляем по формуле (2.23), принимая значение $T = 70$ лет:

$$P(1,70) = 0,0033 \cdot 70 \cdot e^{-0,0033 \cdot 70} = 0,18.$$

3. Риск события определяем по формуле (2.40):

$$R = 1 - e^{-0,0033 \cdot 70} = 0,21.$$

8.3. Оценка энерговыделения при падении космических тел

Для оценки энерговыделения при падении космического тела можно воспользоваться соотношением [59]

$$Q = 1/2 \cdot n \cdot m \cdot V^2, \quad (8.1)$$

где Q – энергия взрыва (Дж); n – коэффициент полезного использования энергии; m – масса тела (кг); V – скорость движения (м/с).

Обычно коэффициент $n < 1$. В приближенных расчетах, носящих оценочный характер, допустимо значение $n \approx 1$.

Пример. Определить мощность взрыва при падении космического тела сферической формы диаметром $d = 10$ км, движущегося со скоростью $V = 30$ км/с, плотность вещества тела $\rho = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³.

Решение. Энергию взрыва находим по формуле (8.1):

$$Q = 1/2 \cdot n \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot \rho \cdot V^2 = 1/2 \cdot 1 \cdot 4/3 \cdot 3,14 \cdot 5000^3 \cdot 2500 \cdot 30000^2 = 5,9 \cdot 10^{23} \text{ Дж}.$$

Нетрудно показать, что энерговыделение при падении на земную поверхность космических тел сферической формы диаметром 100 м и 1 км, плотностью вещества $\rho = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³, движущихся с аналогичной скоростью $V = 30$ км/с, составляет $5,9 \cdot 10^{17}$ Дж и $5,9 \cdot 10^{20}$ Дж соответственно, что совпадает с данными п. 1.1.

Самостоятельный интерес представляет оценка на энергетическом уровне масштабов катастроф, имевших место при падении космических тел в прошлом. Для этого могут быть использованы данные табл. 36.

В работе [60] получена зависимость между энерговыделением при падении таких тел на земную поверхность и размерами астроблем:

$$r_B = kQ^{1/3,4}, \quad (8.2)$$

где Q – энерговыделение при падении космического тела (Дж); k – эмпирический коэффициент; r_B – радиус воронки (м).

Воспользовавшись данными п. 1.1, согласно которым энерговыделение при падении астероида, образовавшего Попигайский кратер, оценивается величиной $10^{23} \dots 10^{24}$ Дж, и данным табл. 36 по размерам диаметра астроблемы $d = 100$ км (следовательно, $r_B = 50000$ м), можно определить величину коэффициента $k = (4,7 \dots 8,7)10^{-3}$. Несомненно, в дальнейшем необходимо более глубокое основание величины этого коэффициента и его уточнения.

Разрешая соотношение (8.2) относительно величины Q , несложно получить

$$Q = k^{-3,4} \cdot r_B^{3,4}, \quad (8.3)$$

где величины Q , r , k имеют тоже значение, что и в соотношении (8.2).

Читателю предоставляется возможность самостоятельно оценить энерговыделение и размеры астроблемы в гипотетическом случае падения астероида «Эрос», имеющего диаметр приблизительно 20 км и движущегося со скоростью 30 км/с. Прохождение этого астероида в опасной близости от Земли ожидается в течение ближайших 100000 лет.

Как отмечалось ранее, при взрыве, сопровождающем падение космического тела на земную поверхность, формируется мощная ударная воздушная волна, являющаяся основным поражающим фактором такого взрыва. Очаг поражения в месте взрыва имеет круговую форму. Приблизительно радиус очага можно определить по соотношению [61]

$$R_{o.п.} = 8,2 \cdot 10^{-2} Q^{1/3}, \quad (8.4)$$

где $R_{o.п.}$ – радиус очага поражения, м; Q – энерговыделение при падении космического тела, Дж.

На границе очага поражения во фронте ударной волны составляет $\Delta P_0 = 10$ кПа. Очаг поражения подразделяют на зоны полного,

сильного, среднего и слабого разрушения, на внешних границах давление составляет 50, 30, 20, 10 кПа соответственно.

Радиусы внешних границ зон полного, сильного, среднего и слабого разрушений находят по соотношению (8.4), принимая в нем значение численного коэффициента равными $2,9 \cdot 10^{-2}$; $3,9 \cdot 10^{-2}$; $5,0 \cdot 10^{-2}$; $8,2 \cdot 10^{-2}$ соответственно.

Более подробно об очаге поражения при взрыве изложено в [61].

Пример. Определить радиус очага поражения по ударной волне при взрыве, сопровождающем падение космического тела сферической формы диаметром 1 км, движущегося со скоростью 30 км/с, плотность вещества тела – 4250 кг/м^3 .

Решение: 1. По формуле (8.1) находим энергию взрыва:

$$Q = 1/2 \cdot 1 \cdot 4/3 \cdot 3,14 \cdot 500^3 \cdot 4250 \cdot 30000^2 = 10^{21} \text{ Дж.}$$

2. Радиус очага поражения вычисляем по соотношению (8.4):

$$R_{\text{о.п.}} = 8,2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{21/3} = 8,2 \cdot 10^5 \text{ м} = 820 \text{ км.}$$

Диаметр очага поражения составляет $2R_{\text{о.п.}} = 1640 \text{ км}$. Большие размеры очага поражения поясняют оценку, согласно которой человеческие потери при падении такого тела в густонаселенном районе Земли могут составить значительную часть населения нашей планеты [58].

В заключение следует отметить редкое природное явление, называемое «парадом планет». Это особое расположение планет Солнечной системы, когда при своем движении вокруг Солнца они выстраиваются в линию (по радиусу Солнечной системы). Последний парад планет наблюдался в 1999 г. Были отмечены изменения в магнитном, электрическом и гравитационном полях Земли. Последствия данного события изучаются.

8.4. Проблема безопасности, связанная с падением космических тел

Падение крупных космических тел на Землю представляет особую опасность. Так как такое событие может представлять угрозу существования значительной части населения нашей планеты и даже всему человечеству, необходимо объединение усилий всех стран для предотвращения возможной катастрофы. Создание системы защиты Земли от опасных космических объектов (ОКО) – технически сложное и экономически дорогостоящее мероприятие. Прежде всего,

необходимо создание глобальной сети телескопов для постоянного наблюдения за крупными астероидами и кометами, а также создание при обсерваториях вычислительных центров, оснащенных мощными ЭВМ для расчетов траекторий движения ОКО.

С целью изменения траектории ОКО представляются необходимыми встречные пуски ракет с ядерными зарядами, достижение ими заданных точек пространства в точно рассчитанное время и осуществление необходимого количества контактных на поверхности космического тела или заглубленных ядерных взрывов. Не исключены и другие способы воздействия на ОКО, например, использование лазерного оружия. В целом, это достаточно сложная задача. Но она должна быть решена.

Следует иметь в виду, что из космоса возможно появление объектов с такими свойствами, которые до сих пор не известны человечеству, и которые не могут быть заранее спрогнозированы [58]. Но чем больше люди будут изучать опасные космические объекты, тем меньше будет неопределенность в их свойствах, тем выше будет эффективность мер противодействия.

Глава 9. МАССОВЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ ЛЮДЕЙ, ЖИВОТНЫХ, РАСТЕНИЙ

9.1. Эпидемии

Эпидемия (от греч. *epidemia*; *epi* – на, *demos* – народ) – распространение какой-либо инфекционной болезни человека, значительно превышающее обычный уровень заболеваний на данной территории. В основе эпидемий лежит эпидемический процесс, т.е. непрерывный процесс передачи возбудителя инфекции и непрерывная цепь последовательно развивающихся инфекционных состояний (заболевание, бактерионосительство, распространение) в коллективе. Возбудителями заболевания являются болезнетворные микробы и вирусы [62-64].

Микробы (от греч. *micros* – малая величина чего-либо и *bios* – жизнь) – собирательное название бактерий и микроскопических грибов, т.е. микроорганизмов, исключая простейшие и вирусы. Иногда микробами называют все микроорганизмы.

Бактерии – группа микроскопических, преимущественно одноклеточных микроорганизмов. Относятся к «доядерным» формам, т.е. не обладающим оформленным клеточным ядром и типичным хромосомным аппаратом. Наследственная информация реализуется через дезоксирибонуклеиновую кислоту. Питаются, используя органические вещества или создавая органические вещества клеток из неорганических. Участвуют в круговороте веществ в природе. Патогенные (болезнетворные) микробы – возбудители болезней растений, животных и человека.

Вирусы (от лат. *virus* – яд) – мельчайшие неклеточные частицы, состоящие из дезоксирибонуклеиновой (ДНК) и рибонуклеиновой (РНК) кислоты и белковой оболочки. Вирусы – внутриклеточные паразиты, они размножаются только в живых клетках. Нуклеиновые кислоты ДНК и РНК – высокомолекулярные органические вещества. Они присутствуют в клетках всех живых организмов и выполняют важнейшие функции по хранению и передаче генетической информации; участвуют в механизмах, при помощи которых она реализуется в процессе синтеза клеточных белков.

Основными специфическими свойствами микробов – возбудителей инфекционных заболеваний являются: способность передаваться от больного к здоровому и таким образом распространяться среди людей и вызывать массовые заболевания; наличие скрытого (инкубационного)

периода; сложность процесса диагностики; способность некоторых возбудителей Длительное время сохраняться в воде, продовольствии, почве, на различных предметах, одежде, а также в организме насекомых; трудности обнаружения во внешней среде.

Основные пути передачи инфекции:

контактно-бытовой – при общении с больными людьми и животными, потреблении зараженной воды и пищи, соприкосновении с зараженными предметами, одеждой;

воздушно-капельный – при чихании и кашле больного в местах скопления людей (общественного транспорте, на производстве, в кино, театре и т.д.);

при укусах грызунов, клещей, насекомых – живых переносчиков заболеваний.

В зависимости от масштабов заболевания различают:

спорадическая заболеваемость – единичное инфекционное заболевание;

эпидемическая вспышка – групповое заболевание на ограниченной территории;

эпидемия – значительное превышение заболеваемости данной инфекционной болезнью в районе, области и т.д.;

пандемия – распространение заболевания на больших территориях, иногда ряда стран.

Следует отметить, что эпидемии и особенно пандемии могут иметь характер настоящих стихийных бедствий. Примерами могут служить эпидемии проказы и оспы в XI – XIV веках в Европе и Азии, эпидемия чумы в XIV веке в Европе (погибло 25 млн. человек, т.е. около четверти населения Европы), шесть последовательных эпидемий холеры в 1817-1917 гг. в Европе, Индии, Америке, эпидемия оспы в 1913 г. в России (свыше 152 тыс. случаев), эпидемия гриппа (испанки) в 1918-1920 гг., когда в Западной Европе умерло свыше 20 млн. человек – почти столько же, сколько погибло в течение первой мировой войны [1].

Эпидемии время от времени возникают и в последнее время. Например, только благодаря чрезвычайным мерам были своевременно ликвидированы очаги холеры на юге нашей страны, в частности в Астрахани в 1970 г.

Некоторые опасные инфекционные заболевания [62-72]:

Холера – острое карантинное заболевание человека [62, 63, 65]. Возбудитель болезни холерный вибрион. Вибрионы – бактерии, имеют форму коротких, изогнутых в виде запятой палочек. Способны к быстрым колебательным движениям – отсюда их название. Обитают в

водоемах, почве, содержимом кишечника. Заражение человека происходит при попадании вибрионов в желудочно-кишечный тракт с зараженной водой, пищей, возможен перенос возбудителя мухами. Главный путь – водный, вследствие спуска неочищенных сточных вод в открытые водоемы. Инкубационный период 2-3 суток. Далее водянистый понос (30 – 40 раз в сутки), рвота, явления интоксикации. В результате потери воды происходит обезвоживание организма, падает кровяное давление, появляются одышка, судороги, температура больного понижается до 34° – 35°. Состояние больного очень тяжелое.

Исторический эпидемический очаг холеры - бассейн рек Ганга и Брахмапутры в Индии, что обусловлено влажным климатом, высокой плотностью населения, использованием необеззараженной воды для питья. Из Индии холера заносилась в другие страны: Афганистан, Иран, страны Юго-Восточной Азии и дальнего Востока. С 1817 г. по 1926 г. наблюдалось 6 пандемий. В Россию холера заносилась из Ирана, Афганистана, Турции сначала обычно в Астрахань, Закавказье, Среднюю Азию. В 1848 г. в нашей стране холерой заболело 1,7 млн. человек, из них умерло 700 тыс. человек. Опасная вспышка холеры имела место на юге страны в 1970 г. Благодаря своевременно принятым мерам угроза эпидемии была ликвидирована.

Чума – острое карантинное заболевание человека [62, 63, 66]. Возбудитель болезни – чумная бактерия. Характеризуется природной очаговостью, связанной с пустынным, степным и предгорным ландшафтом. В очаге эпидемический процесс поддерживается определенными видами грызунов. Эпидемическая опасность увеличивается при заносе возбудителей чумы в популяции связанных с человеком грызунов, например, крыс. Заражение человека происходит трансмиссивным (через блох) и редко – контактным путем, заражение от человека – через блох. Инкубационный период 2-6 суток. Далее озноб, головная боль, температура поднимается до 40°, интоксикация, помрачение сознания, симптомы поражения оболочек мозга. При бубонной чуме появляются бубоны (бубон – от греч. *bubon* – пах, опухоль в паху) – увеличение лимфатических узлов воспалительного характера; при легочной – симптомы воспаления легких (в последнем случае возможна передача инфекции воздушно-капельным путем). Болезнь протекает очень тяжело. Как отмечалось ранее, при эпидемии чумы в XIV веке в Европе погибло 25 млн. человек.

Оспа (натуральная) – карантинное заболевание человека, характеризующееся высокой заразностью, своеобразной узелково-пузырьковой сыпью, оставляющей после себя рубцы, оспины [62, 63, 67].

Возбудитель – фильтрующийся вирус. Источник инфекции – больной человек. Вирус передается через воздух (с капельками слизи, пылью) и реже через предметы (белье, игрушки). Инкубационный период 5-17 суток, в среднем – 14 суток. Далее – резкое повышение температуры (до 40°), мучительная головная боль, тошнота, боль в области крестца. Потом появляется сыпь в виде неярких красных пятен на лице, туловище, конечностях. Сыпь проходит несколько стадий развития: узелки, пузырьки, гнойнички. Заболевание длится 35 – 45 суток.

Упоминания об оспе встречаются в древнеегипетских и древнекитайских рукописях, описаниях врачей Древней Греции и Рима. В XII веке оспа была занесена из Азии в Европу при крестовых походах; в XVI веке на кораблях Д. Кортеса – из Европы в Америку. В России упоминание об этой болезни встречается в летописях XV века. В XV – XVII веках эпидемии оспы в Европе уносили сотни тысяч человеческих жизней и обезображивали лица выживших.

В борьбе с оспой важное значение имеют профилактические мероприятия – противооспенная прививка всему населению. В нашей стране оспа ликвидирована окончательно в 1937 году.

Проказа (лепра) – опасное инфекционное заболевание [62, 63, 68]. Возбудитель – один из видов микробактерий. Считают, что возбудитель проказы проникает в организм здорового человека через слизистые оболочки верхних дыхательных путей и поврежденную кожу. Инкубационный период 4-6 лет (иногда 10-20 лет и более). При заболевании поражается кожа, слизистые оболочки, лимфатические узлы, нервные стволы, внутренние органы. На лице, реже на предплечьях, голених и других местах образуется множество полусферической формы инфильтратов (лепромы) синюшно – коричневого цвета величиной до лесного ореха с блестящей сальной поверхностью. Инфильтраты на лице придают ему вид «львиной морды». Они могут сохраняться многие месяцы и даже годы с последующим превращением в рубцовую атрофию с пигментацией или же распадом с изъязвлениями.

Проказа была известна с древних времен на Ближнем Востоке, в Китае, Индии, Японии. В XX веке она наблюдается в Африке, Азии, Центральной и Южной Америке. Число больных – несколько миллионов человек (в 1974 г. – 10 млн. человек [1]). Способствуют распространению болезни антисанитарная обстановка, скученность населения, плохое питание, авитаминоз. Больных проказой изолируют и лечат в специальных учреждениях – лепрозориях.

Грипп (инфлюэнца) – быстро распространяющееся среди населения. Острое вирусное заболевание дыхательных путей [62-64, 69]. Возбудитель болезни – вирус гриппа. Известны несколько видов вируса гриппа. Характерная особенность некоторых из них – непрерывная изменчивость свойств, сопровождающаяся периодическим возникновением новых подтипов, не вызывающих у заболевших перекрестного иммунитета. Источник инфекции – больной человек, реже – здоровый вирусоноситель. Заражение в основном воздушно – капельным путем: при кашле, чихании, разговоре с больным. При заражении наблюдается короткий инкубационный период (1-2 дня) с последующим быстрым развитием болезни. В начале умеренные по интенсивности раздражения слизистых оболочек носовых ходов, глотки, зева, гортани, бронхов сопровождаются интоксикацией организма, которая вызывает резкий упадок сил, общую «разбитость», головную боль. Появляются озноб, выделения со слизистых оболочек носовых ходов (сопли), конъюнктивит, повышается температура. Часто развиваются осложнения бактериального происхождения: воспаление среднего уха, тонзиллит, ларингит, пневмония, менингоэнцефалит. Как последствия общей интоксикации возможны опасные поражения сердечно-сосудистой системы.

Некоторая часть населения не считает грипп серьезным заболеванием. Поэтому можно видеть заболевших людей в общественном транспорте, на производстве, что приводит к распространению инфекции. Такое отношение к болезни – опасное заблуждение. Следует помнить, что в 1918-1920 гг. от эпидемии гриппа умерло 20 млн. человек.

С целью предупреждения возникновения и распространения эпидемии гриппа проводится массовая иммунизация населения гриппозной вакциной из ослабленных вирусов. При заболевании – изоляция больного на дому, постельный режим. Методы лечения направлены на облегчение интоксикации введением иммунного глобулина и на подавление бактериальной микрофлоры применением антибиотиков.

Тиф (то греч. typhos – дым, помрачение сознания) – острое инфекционное заболевание человека [62, 64, 70]. Различают несколько видов тифа.

Сыпной тиф. Возбудитель – риккетсии Провачека. Риккетсии – мелкие болезнетворные бактерии размером не крупнее некоторых вирусов. Относятся к внутриклеточным паразитам, т.к. размножаются только в клетках хозяина. Источник болезни – больной человек.

Переносчик возбудителя – вши (чаще всего платяная вошь), которые заражаются при сосании крови больного и спустя 5-6 суток способны распространять инфекцию. Заражение человека происходит при втирании в кожу (расчёсы) или при попадании на слизистые оболочки экскрементов вшей. Эпидемии сыпного тифа наблюдаются во время войн, голода и других социальных бедствий, сопровождающихся нищетой, ухудшением социальных условий жизни (отсюда установившиеся названия «голодный тиф» или «военный тиф»). При заражении имеет место инкубационный период от 3 до 20 суток, в среднем ~12 суток. Далее повышение температуры до 40°, мучительная головная боль. На 4-5 сутки на теле человека появляется сыпь, не распространяющаяся на лицо. Нарушение сознания.

Лечение: антибиотики тетрациклиновой группы; средства, уменьшающие интоксикацию; сердечно-сосудистые препараты. Важно полноценное питание, уход за больным. Основа профилактики – борьба с вшивостью. Распространение эпидемии прекращают путем ранней изоляции больных, санитарной обработкой в очаге.

Возвратный тиф. Характеризуется периодическими лихорадочными приступами. Возбудители – спирохеты (от греч. *speira* – изгиб, виток и *chaite* – волос) – бактерии, клетки которых имеют вытянутую спирально извитую форму. Различают эпидемический (вшивый) тиф и эндемический (клещевой) тиф.

Эпидемическим тифом болеет только человек. Переносчик инфекции – платяные вши. Спирохеты попадают в кровь здорового человека через ранки, царапины, расчёсы, при раздавливании вшей. Проникнув через ранку, спирохеты попадают в общий ток крови, далее – в селезёнку, печень, центральную нервную систему. Инкубационный период от 2 до 14 суток. Потом – озноб, быстрое повышение температуры до 40°-41°. У больного появляется слабость, сильные мышечные боли, особенно резкие в области икроножных мышц, у многих – повторные носовые кровотечения. Кожа сухая, горячая, слегка желтушная. Пульс учащен. Увеличиваются селезенка и печень. Первый лихорадочный приступ продолжается 5-8 суток. Потом температура падает до нормальной, что сопровождается обильным потом. Наступает период нормальной температуры называемый аппрексией. Он длится 6-8 суток. Внезапно после озноба температура снова резко повышается – начинается второй приступ болезни (3-5 суток), затем аппрексия. Через 8-12 суток – третий приступ. Лечение в лечебных учреждениях. Профилактика – раннее выявление больных и их госпитализация. Борьба с вшивостью.

Эндемический тиф относится к природно-очаговым инфекциям. Очаги эндемического тифа находятся в Африке, Азии (Иран, Ирак, Афганистан, Китай), Центральной и Южной Америке, в Европе – Испании. Носители инфекции – грызуны, переносчики – клещи. Течение болезни сходно с описанной выше картиной заболевания, но отличается некоторой мягкостью. Заболевание таким тифом чаще всего наблюдается весной и летом среди людей, впервые прибывающих в местность природного очага (экспедиции, командировки, военные части).

Брюшной тиф. Болезнь наблюдается только у человека. Большой выделяет брюшнотифозные бактерии с испражнениями и мочой. Бактерии размножаются в воде, молоке, на овощах и фруктах. В переносе бактерий определенную роль играют мухи. Заражение происходит при попадании бактерий в организм здорового человека через рот с поверхности загрязненных рук. Инкубационный период 10-14 дней. Потом ухудшение самочувствия, снижение аппетита, головные боли, температура постепенно повышается. Кожа на лице становится бледной. Язык покрывается серым налетом. Живот вздут. Печенка и селезенка увеличены. В конце третьей недели болезнь может осложниться кишечным кровотечением, прободением кишечной язвы, воспалением легких, тромбофлебитом. Болезнь длится 3-6 недель. Больной обязательно госпитализируется. Лечение - антибиотиками.

Дизентерия – острое инфекционное заболевание человека с поражением толстого кишечника (понос) и общей интоксикацией организма [62-65, 71]. Возбудитель болезни – бактерии рода шигелл. Заражение от больного и бактерионосителей через воду, пищу, мух, грязные руки. Способствуют распространению инфекции антисанитарная обстановка (особенно в местах общественного питания, туалетах), пренебрежительное отношение к личной гигиене. В обиходе: «дизентерия – болезнь грязных рук».

Чумой XX века называют инфекционное заболевание СПИД – синдром приобретенного иммунного дефицита [72]. Характеризуется патологическим состоянием, при котором в результате поражения иммунной системы ослабевают защитные силы организма. Заболевание вызывается вирусом иммунодефицита человека (ВИЧ). Источник инфекции – носитель вируса. По данным ООН к началу XXI века число заболевших СПИД и зараженных ВИЧ составляло ~36 млн. человек.

Заражение: главным образом при половых контактах (особенно при гомосексуальных); от больной матери – плоду во время беременности;

при родах, во время кормления новорожденного грудью; при переливании крови, инъекциях. Первые проявления болезни: лихорадка, воспаление лимфоузлов и некоторые специфические изменения – возникают от трех суток до нескольких месяцев после заражения. Период вторичных проявлений длится от нескольких месяцев до 8-10 лет и завершается формированием СПИД, который в течение 1-5 лет приводит больного к смерти (в силу резкого ослабления защитных свойств организма возникают различные поражения, преимущественно вызываемые различными вирусами).

Необходимо отметить, что на распространение рассмотренных выше инфекционных заболеваний оказывают влияние: условия жизни людей, иммунитет (невосприимчивость к данным заболеваниям), уровень общей санитарной культуры населения, состояние лечебно-профилактической и санитарно-профилактической работы, направленной на предупреждение распространения инфекционной болезни, достижения медицины в изучении этих болезней, обеспечение лекарствами и другие факторы. При возникновении очага инфекционного заболевания на зараженной территории проводятся специальные лечебно – профилактические мероприятия (вводится карантин или обсервация).

9.2. Эпизоотии

Эпизоотии представляют собой широкое распространение болезней животных в районе или стране, а иногда даже на целом материке. К числу Наиболее известных заболеваний животных относятся: сибирский ящур, туляремия, сибирская язва и др. Следует отметить, что при общении человека с больными этими болезнями животными возможно заболевание и человека. Их называют общими для человека и животных. Некоторые инфекционные заболевания поражают животных отдельных видов, например, чума крупного рогатого скота, свиней, птиц и т.д.

Большой ущерб народному хозяйству наносит массовое распространение саранчи, колорадского жука, совки, майского жука, сибирского шелкопряда, термитов. В прошлом в низовьях рек, впадающих в Каспийское, Азовское и Черное моря, двигались целые тучи саранчи. Саранча передвигалась со скоростью до 0,5 км/час, уничтожая на своем пути буквально все. Её личинки двигались по земле в таких количествах, что были случаи пробуксовки колёс и остановки

поездов на железной дороге. Саранча до сих пор наносит ни с чем не сравнимый ущерб сельскому хозяйству в ряде стран Африки, Азии и Ближнего Востока. Так в Сомали стая саранчи в 1958 г. уничтожила за день 400 тысяч тонн зерна. Губительные нашествия саранчи наблюдались в 1950-1963 гг. Налётам саранчи подвержено почти 20 % территории суши земного шара [1].

Вспышки распространения биологических вредителей наблюдалось в нашей стране и во второй половине XX века. Например, большой вред лесонасаждениям, особенно хвойным деревьям, нанес сибирский шелкопряд. От него в Восточной Сибири погибли сотни тысяч гектаров хвойной тайги, прежде всего кедровой. В 1973 г. чрезвычайно опасная вспышка сибирского шелкопряда в кедровых лесах Присяянья в Зиминском и Черемховском районах была ликвидирована с помощью лесной авиации, биологических и химических средств (распылением хлорофоса) [1].

9.3. Эпифитотии

Эпифитотии – заболевания растений. К наиболее опасным заболеваниям растений в нашей стране относятся: ржавчина хлебных злаков, при поражении которой потери составляют 40...70 %; фитофтороз, или картофельная гниль, при котором поражаются грибом листья, стебли и клубни картофеля; пиокулариоз риса – грибковое заболевание, потери могут достигать ~90 % и др. [1].

Гибель и болезнь растений могут явиться также следствием неправильного применения различных химических веществ, которые используются для уничтожения сорняков и дикорастущих кустарников, удаления или подсушивания листьев сельскохозяйственных растений, а также как стимуляторы роста и созревания.

Гербициды применяют для уничтожения или частичного подавления растительности, кустарников и деревьев. По характеру действия на растения гербициды разделяются на гербициды сплошного действия, уничтожающие и подавляющие растения всех видов, и гербициды избирательного действия, поражающие растения отдельных видов. Избирательность действия зависит от доз, сроков и способов применения. При большей дозе на единицу площади гербицид избирательного действия может вызвать гибель всех растений.

Дефолианты – вещества, вызывающие опадание листьев вследствие их обезвоживания. Листья становятся светло-серыми, сморщиваются,

постепенно подсыхают и спадают; через четверо суток спадает – 75 % листьев, к 12-му дню ~90 %.

Десиканты – препараты, применяющиеся для высушивания листьев растений, кустарников, деревьев. На обрабатываемых десикантами деревьях листва изменяет окраску и может длительное время не спадать, резко выделяясь на общем фоне зелени.

9.4. Карантин, обсервация

Как отмечалось в п. 9.1, при возникновении очага инфекционного заболевания вводятся карантин или обсервация.

Постоянные карантинные мероприятия в отношении людей, животных и растений осуществляется также таможенными на государственных границах.

Карантин – это система противоэпидемических и режимных мероприятий, направленных на полную изоляцию очага заражения от окружающего населения и ликвидацию инфекционных заболеваний в нем. Вокруг очага устанавливается вооруженная охрана, запрещается въезд и выезд, а также вывоз имущества. Снабжение карантинизированных производится через специальные пункты под строгим медицинским контролем.

Обсервация – это система изоляционно-ограничительных мероприятий, направленных на ограничение въезда, выезда и общения людей на территории, объявленной опасной, усиление медицинского наблюдения, предупреждение распространения и ликвидацию инфекционного заболевания. Вводится при установлении возбудителей инфекции, не относящихся к группе особо опасных, а также в районах, непосредственно соприкасающихся с границей карантинной зоны.

Некоторые данные об условиях введения карантина и обсервации приведены в табл. 37 [1].

К основным действиям при борьбе с эпидемиями, эпизоотиями, эпифитотиями и распространением вредителей сельского и лесного хозяйства, а также эпидемическим мероприятиям, проводимым на территории, объявленной зоной карантина или обсервации, относятся следующие мероприятия.

Проведение экстренной профилактики населения антибиотиками (предохранительные прививки), а после установления характера заболевания и его возбудителя – специфической профилактики. Раннее выявление больных, у которых предполагают данное заболевание,

изоляция, госпитализация и лечение заболевших. Доставка больным и подвергнутым карантину воды, питания и одежды. Дезинфекция территории, сооружений и имущества. Захоронение погибших. Установление на транспорте, промышленных объектах, предприятиях общественного питания, торговли режима работы, исключающего возможность заноса и распространения инфекции. Противоэпидемические и противоэпифитотические профилактические мероприятия, направленные на предотвращение заболеваний животных и растений. Дезинсекция, биологическая, химическая и механическая борьба с вредителями сельского и лесного хозяйства (опрыскивание, опыление, окапывание канавами очагов распространения вредителей).

Таблица 37

Условия введения и сроки карантина и обсервации

Возбудитель	Средний инкубационный период, сутки	Опасность больного для окружающих	Срок обсервации, сутки	Срок карантина и условия его введения
Чумы	1-3	Очень опасен		6 суток
Холеры	1-3	Очень опасен		6 суток
Сибирской язвы	1-3	Мало опасен	8	Может устанавливаться на 8 суток при массовой заболеваемости и наличии контактного распространения
Туляремии	3-6	Не опасен	6	Не устанавливается
Сапа	2-3	Опасен	14	Может устанавливаться на 14 суток при массовой заболеваемости и наличии контактного распространения
Сыпного тифа	10-14	Опасен, при наличии педикулеза	23	Может устанавливаться на 23 суток при массовой заболеваемости и наличии контактного распространения
Оспы	13-14	Очень опасен	-	17 суток
Ботулинический токсин	до 1	Не опасен	2	Не устанавливается

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема предотвращения возникновения катастроф от опасных природных процессов, смягчения их последствий и ликвидации весьма актуальна сегодня не только для России, но и для всего человечества. Это обусловлено ежегодным увеличением количества, масштабов катастроф, ростом людских и материальных потерь, которые несет человечество, что сдерживает развитие цивилизации, а в некоторых случаях ставит под угрозу существование человечества.

В учебном пособии мы познакомили студентов с катастрофами природного характера, рассказав о причинах их возникновения и масштабах. Затронули вопрос глобальных проблем, несущих угрозы человечеству. Показали возможность и способы управления рисками возникновения катастроф.

Рассмотрены причины и механизмы формирования опасных природных процессов, дана их классификация, приведены основные поражающие факторы и методики расчета обстановки в очагах поражения, а также рассмотрены защитные мероприятия от этих опасных процессов.

Мы постарались показать, что на определенном уровне управления усилиями человека, государства, мирового сообщества можно предотвратить возникающие катастрофы или смягчить их последствия, осуществить ликвидацию последних.

В этом направлении проделана значительная работа как в России, так и в странах мирового сообщества, создано необходимое правовое поле в этой области.

Мы твердо уверены в том, что, дальнейший научный поиск поможет человечеству найти способ решить глобальные проблемы, несущие угрозу его существованию, что управление рисками катастроф от опасных природных процессов будет постоянно совершенствоваться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций/ Под ред. М. И. Фалеева. – Калуга: Облиздат, 2001. – 480 с.
2. Гир Д., Шах Х. Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. – М.: «Мир», 1988.
3. Дэвис Ли. Природные катастрофы. Т.1 / Пер. с англ. – Смоленск: «Русич», 1996.
4. Резанов И.Л. Великие катастрофы в истории Земли. – М.: «Наука», 1980.
5. Чистов В.Г., Галиева Л.М. и др. Проблема создания защиты Земли от астероидов и комет // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 10. ВИНТИ. – М., 1996.
6. Большая советская энциклопедия. Т.9. «Сов. энциклопедия». – М., 1972.
7. Требушко О.И. Основы теории упругости и пластичности. – М.: «Наука», 1984.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: «Наука», 1978.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: «Наука», 1973.
10. Ю.Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.2. – М.: «Наука», 1970.
11. Шейдеггер А.Г. Физические аспекты природных катастроф. / Пер. с англ. – М.: «Недра», 1981.
12. Тарасов А.В. Физика в природе. – М.: «Просвещение», 1988.
13. Асада Т., Исибаси К. и др. Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. – М.: Недра, 1984.
14. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация / Под ред. К.Е. Кочеткова, К.Е. Котлякова, А.В. Забегаева Кн.1. – М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 1995.
15. Морозов В.Н. Оценка сейсмической опасности в регионах СНГ для строительных объектов // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып.2. ВИНТИ. – М., 1993.
16. Садовский М.А., Кириллов Ф.А. Сейсмический эффект взрывов и современное состояние его изучения / Сб. Взрывное дело. №37. – М., 1939.
17. Рагозин А. Л. Концепция допустимого риска и строительное освоение территорий развития опасных природных и техноприродных процессов // Проект. – 1993. – № 5-6. С. 20-26.
18. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. Механический эффект подземного взрыва / Под ред. М.А. Садовского. – М.: «Недра», 1971.

19. Базилевский А.Т., Иванов Б.А. Обзор достижений механики кратерообразования / Сб. Механика образования воронок при ударе и взрыве. №12. – М.: «Мир», 1977.
20. Действие ядерного оружия / Пер. с англ. – М.: «Воениздат», 1960.
21. Атоманюк В.Г. и др. Гражданская оборона. – М.: «Высш. шк.», 1980.
22. Сейсмика и воронки выброса при подземных взрывах / Под ред. Ромашова А.Н., Харина Д.А. СБ. 64/21 – М.: «Недра», 1968.
23. Морозов В.И., Шахраманьян М.А. Прогнозирование и ликвидация последствий аварийных взрывов и землетрясений. – М.: «УРСС», 1998.
24. Газлийское землетрясение 1976 года. Инженерный анализ последствий. – М.: «Наука», 1982.
25. Сейсмическое районирование территории СССР / Под ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшкова. – М.: «Недра», 1964.
26. Природные опасности России. Сейсмические опасности. Тематический том / Под ред. Г. А. Соболева. – М.: Изд-во «КРУК», 2000. – 296 с.
27. Измалков В.И., Измалков А.В. Техногенная и экологическая безопасность и управление риском. – М.; СПб.: НИЦЭБ РАН, МЧС России, 1998. – 482 с.
28. Яковлев В.В. Параметрические и координатные законы поражения // Вестник ИВТОБ №1. – СПб.: «Нестор»; СПбГТУ, 2000.
29. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М., Пучков В.А. и др. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие для вузов. – М.: ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.
30. Кузнецов И.В., Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Методы расчета ущерба от катастроф различного типа // Экономика и математические методы. – 1997. – Т. 33. – Вып. 4. – С. 39-50.
31. Новый каталог землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975г. – М., 1997.
32. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: «Наука», 1975.
33. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. «Гидрометеоиздат». – Л., 1988.
34. Гинко С.С. Катастрофы на берегах рек. – Л.: «Гидрометеоиздат», 1977.
35. Кульмач П.П. Сейсмостойкость портовых гидротехнических сооружений. – М.: «Транспорт», 1970.

36. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчётам. «Госэнергоиздат». – М.-Л., 1961.
37. Динамика сплошных сред в расчётах гидротехнических сооружений / Под ред. В.М. Лятхера, Ю.С. Яковлева – М.: «Энергия», 1976.
38. Белоусов А.В. Использование микрокалькулятора для прогнозирования параметров активного затопления местности / ВИА им. В.В. Куйбышева. – М., 1988.
39. Корсаков Г.А. Комплексная оценка обстановки и управление предприятием в чрезвычайных ситуациях / Ин-т повышения квалификации работн. судостр. – СПб., 1993.
40. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. – М.: Изд-во ООО «ДЭКС-ПРЕСС», 2003. – 352 с.
41. Природные опасности России. Гидрометеорологические опасности. Тематический том / Под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. – М.: Изд-во «КРУК», 2001. – 296 с.
42. Кулаков В.А. Поражающие факторы чрезвычайных ситуаций: Учебное пособие. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 1994.
43. Понявин И.Д. Волны цунами. – Л.: «Гидрометеиздат», 1965.
44. Воронов И.М. Курс теоретической механики. – М.: «Физматгиз», 1959.
45. Соловьев И.В. Курс общей физики. – М.: «Наука», 1966.
46. Лукьяшко П. Взвиться вихрем // Техника молодёжи. – М.: «Молодая гвардия», 1987.
47. Девнин С.И. Справочник. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. – Л.: «Судостроение», 1983.
48. Большая советская энциклопедия. Т.21 «Сов. энциклопедия». – М., 1975.
49. Большая советская энциклопедия. Т. 19 «Сов. энциклопедия». – М., 1973.
50. Казаров Ю.К. Электродинамика солнечной системы и глобальное потепление // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып.4. ВИНТИ. – М., 2000.
51. Шойгу С.К., Воробьев Ю.Л., Владимиров В.А. Катастрофы и государство. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 160 с.
52. Санкт-Петербургские ведомости №22(2412). – СПб., 2001.
53. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. – Изд-во МГУ, 2000.
54. Арцибашев Е.С. Лесные пожары и борьба с ними. – М.: «Лесная промышленность», 1974.

55. Чельшев В. П. Основы теории взрыва и горения. – М.: МО СССР, 1981. – 211 с.
56. Справочник химика. Т.1. – М.-Л.: «Хим. литература», 1962.
57. Силк Дж. Большой взрыв / Пер. с англ. – М.: «Мир», 1982.
58. Космические катастрофы // Гражданская защита. – 1996. – №1.
59. Станюкевич К.Л. Неустановившиеся движения сплошной среды. – М.: «Наука», 1971.
60. О'Киф Дж. Д., Арене Т. Дж. Ударные эффекты при столкновении больших метеоритов с Луной // Сб. Механика образования воронок при ударе и взрыве / Пер. с англ. – М.: «Мир», 1977. – №12.
61. Храмов Г.Н. Техногенные взрывы: Учеб. пособие. – СПб.: «Нестор»; СПбГТУ, 1998.
62. Токаревич К.Н. По следам минувших эпидемий. – Л.: «Лениздат», 1986.
63. Ошеров С.А., Заостровцев И.Т. Учеб. пособие по медицинской службе гражданской обороны / Под ред. П.Н. Сафронова. – М.: «Медицина», 1975.
64. Смирнов В.И. Война и военная медицина. – М.: «Медицина», 1979.
65. Покровский В.И., Малеев В.В. Холера. – Л., 1978.
66. Николаев Н.И. Чума. – М., 1968.
67. Бургасов П.Н., Николаевский Г.П. Натуральная оспа. – М., 1972.
68. Клиника и лечение лепры / Под ред. А.А. Ющенко. – Астрахань, 1976.
69. Злыдников Д.М. и др. Проблемы гриппа. Научный обзор. – М., 1971.
70. Большая советская энциклопедия. Т.25. «Сов. энциклопедия». – М., 1976.
71. Гукасян А.Г. Желудочно-кишечные заболевания и их предупреждение // «Знание». – М., 1963.
72. Чайка Н.А., Клевакин В.М. СПИД: чума XX века. – Л.: «Лениздат», 1989.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ	5
1.1. Природа землетрясений и их классификация	5
1.2. Строение Земли. Движение земной коры	8
1.3. Некоторые сведения из теории упругости. Особенности напряженного состояния твердого тела	10
1.4. Обобщенный закон Гука.....	21
1.5. Распространение колебаний в упругой среде	24
1.6. Потенциальная энергия напряжений	26
1.7. Волновая система при землетрясении	27
1.8. Магнитуда землетрясения. Связь магнитуды с энергией землетрясения	35
1.9. Интенсивность землетрясений. Шкалы MSK-64 и Рихтера	37
1.10. Оценка воздействия землетрясения на различные объекты.....	41
1.11. Сейсмический эффект и местное действие взрыва	50
1.12. Очаг поражения при землетрясении	55
1.13. Прогноз землетрясений. Меры защиты. Сейсмостойкое строительство.....	58
Глава 2. ОЦЕНКА ОБСТАНОВКИ В ОЧАГЕ ПОРАЖЕНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ	64
2.1. Некоторые сведения из теории вероятностей. Понятие случайной величины	64
2.2. Нормальный закон распределения случайной величины. Распределение Пуассона.....	67
2.3. Построение параметрического и координатного законов поражения	69
2.4. Оценка состояния зданий, сооружений на объекте после землетрясения	74
2.5. Оценка ущерба.....	78
2.6. Оценка вероятности поражения объектов в зависимости от их сейсмостойкости и сейсмичности района	83
2.7. Сейсмический риск	88
Глава 3. УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ	89
3.1. Реология грунтов.....	89
3.2. Устойчивость склонов, сложенных рыхлыми и скальными породами.....	91

3.3.	Оползни	95
3.4.	Обвалы. Горные удары	98
3.5.	Скатывающиеся камни	99
3.6.	Снежные лавины	101
3.7.	Защитные мероприятия против оползней, обвалов, снежных лавин.....	105
Глава 4.	ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ.....	107
4.1.	Механизм вулканических извержений.....	107
4.2.	Выброс ядовитых газов в атмосферу, пеплопад, движение лавового потока.....	109
4.3.	Оценка дальности полета вулканических бомб.....	111
4.4.	Энергия вулканических извержений	114
4.5.	Прогноз вулканических извержений. Меры безопасности	115
Глава	5. НАВОДНЕНИЯ.....	117
5.1.	Классификация наводнений	117
5.2.	Половодье	118
5.3.	Паводок	125
5.4.	Волна прорыва при разрушении плотин гидроузлов	127
5.5.	Нагонные наводнения	132
5.6.	Цунами	136
5.7.	Сели	141
5.8.	Защитные мероприятия от наводнений.....	142
Глава 6.	КАТАСТРОФЫ, СВЯЗАННЫЕ С АТМОСФЕРОЙ	145
6.1.	Опасные атмосферные явления.....	145
6.2.	Вихревые движения в атмосфере.....	146
6.3.	Механизм разрушительного действия атмосферных вихрей.....	151
6.4.	Интенсивность ветров. Оценка воздействия ветра на различные объекты.....	153
6.5.	Прогноз погоды. Защитные мероприятия против ураганных ветров.....	155
6.6.	Пыльные бури. Снежные метели	157
6.7.	Грозы. Защита от молний	159
6.8.	Парниковый эффект. Потепление климата	163
Глава 7.	ЛАНДШАФТНЫЕ ПОЖАРЫ.....	167
7.1.	Опасность ландшафтных пожаров.....	167
7.2.	Некоторые сведения о горении. Горючие материалы в лесу	168
7.3.	Лесные и торфяные пожары	174

7.4.	Пожарная опасность в лесу. Распространение пожаров.....	175
Глава 8.	ПАДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ	180
8.1.	Космос и планета Земля.....	180
8.2.	Опасность падения космических тел.....	181
8.3.	Оценка энерговыделения при падении космических тел	183
Глава 9.	МАССОВЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ ЛЮДЕЙ, ЖИВОТНЫХ, РАСТЕНИЙ.....	187
9.1.	Эпидемии	187
9.2.	Эпизоотии	194
9.3.	Эпифитотии	195
9.4.	Карантин, обсервация	196
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	198
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	199

Учебное издание

**Радоцкий Владимир Юрьевич
Шульженко Владимир Николаевич
Смаглюк Александр Александрович**

ОПАСНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Учебное пособие

Подписано в печать 14.03.07. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 12,1. Уч-изд. л. 13,0.

Тираж 50 экз. Заказ Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом
университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46