

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина

ФАКУЛЬТЕТ АРХИТЕКТУРЫ ДИЗАЙНА и СТРОИТЕЛЬСТВА

Кафедра экологии и защиты в чрезвычайных ситуациях  
КРСУ и МЧС КР

# **СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА И ЕЕ ОРГАНИЗАЦИЯ**

**Учебно-методическое пособие**

Бишкек 2024

УДК 699.841

С 28

**Рецензенты:**

*Г.И. Логинов*, д-р техн. наук, профессор Кыргызско-Российского  
Славянского университета им. Б.Н. Ельцина,

*К.И. Кенжетеев*, директор Государственного института  
сейсмостойкого строительства и инженерного проектирования  
Кыргызской Республики

**Авторский коллектив:**

*Б.С. Ордобаев, Дж.А. Рыспаев,*

*Ш.С. Абдыкеева, Д.Н. Мусуралиева, Т.С. Мамбеталиев*

Рекомендовано к изданию

Ученым советом факультета архитектуры дизайна и строительства  
Кыргызско-Российского Славянского университета им. Б.Н. Ельцина

С 28 СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА И ЕЕ ОРГАНИЗАЦИЯ: учебно-  
методическое пособие / Б.С. Ордобаев, Дж.А. Рыспаев,  
Ш.С. Абдыкеева [и др.]. – Бишкек: Издательский дом КРСУ,  
2024. – 76 с.

Изложены материалы о причинах землетрясений, регистрации и прогнозе землетрясений, последствиях сильнейших землетрясений планеты. Приведены характеристики землетрясений, вопросы разработки и моделирования волновых процессов землетрясений.

Рассмотрены вопросы по сейсмостойкому строительству, осуществлен анализ существующих методов расчета железобетонных конструкций на сейсмические воздействия, а также рассмотрен отечественный и зарубежный опыт сейсмозащиты зданий.

Предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и научно-технических работников.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
<b>Глава 1. КРАТКО О ПРИЧИНАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ</b> .....	6
1.1. Характеристика сильных движений грунта .....	6
1.2. Сейсмические волны и их измерение .....	10
1.3. Причины землетрясений .....	11
1.4. Возникновение очага .....	11
1.5. Сопутствующие явления .....	12
1.6. Сейсмический шум и микросеймы .....	13
1.7. Регистрация землетрясений .....	14
1.8. Прогноз землетрясений .....	15
<b>Глава 2. СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО</b> .....	21
2.1. Общие положения .....	21
2.2. Основы инженерной сейсмологии .....	22
2.3. Сейсмическое районирование .....	23
2.4. Сейсмическая разведка .....	24
2.5. Сейсмические станции .....	27
2.6. Анализ существующих методов расчета железобетонных конструкций на сейсмические воздействия .....	28
<b>Глава 3. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ     СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ</b> .....	40
3.1. Сейсмоизоляция сооружений .....	42
3.2. Адаптивные системы сейсмозащиты .....	53
3.3. Системы с повышенным демпфированием .....	56
3.4. Системы с гасителями колебаний .....	62
3.5. Перспективы внедрения систем активной сейсмозащиты в сейсмостойкое строительство .....	67
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	69

## ВВЕДЕНИЕ

Среди наиболее опасных для всего человечества природных катастроф особое место занимают сильные землетрясения. Землетрясения – подземные толчки и колебания поверхности Земли, вызванные естественными причинами (главным образом тектоническими процессами) или искусственными процессами (взрывы, заполнение водохранилищ, обрушение подземных полостей горных выработок). Небольшие толчки могут вызывать также подъём лавы при вулканических извержениях. Ежегодно на всей Земле происходит около миллиона землетрясений, но большинство из них так незначительны, что они остаются незамеченными. Действительно, сильные землетрясения, способные вызвать обширные разрушения, случаются на планете примерно раз в две недели. К счастью, большая их часть приходится на дно океанов, и поэтому не сопровождается катастрофическими последствиями (если землетрясение под океаном обходится без цунами). Землетрясения наиболее известны по тем опустошениям, которые они способны произвести. Разрушения зданий и сооружений вызываются колебаниями почвы или гигантскими приливными волнами (цунами), возникающими при сейсмических смещениях на морском дне. Причиной землетрясения является быстрое смещение участка земной коры как целого в момент пластической (хрупкой) деформации упруго напряженных пород в очаге землетрясения. Большинство очагов землетрясений возникает близ поверхности Земли.

Землетрясения происходили всегда, и во все времена истории нашей планеты от них страдала природа, терпели бедствия люди. Каждое сильное землетрясение в густонаселенной местности является катастрофой. Города и селения, превращенные в руины, множество погибших, огромный материальный ущерб – вот та страшная дань, которую ежегодно собирает с человечества подземная стихия. Ежегодно во всем мире в среднем регистрируется, по меньшей мере, миллион землетрясений; из них только одно или два достигают магнитуды 8, около двадцати обладают достаточной силой, чтобы заставить содрогаться всю нашу планету, сто или двести бывают разрушительными, тысяча причиняют некоторый ущерб и триста тысяч ощущаются отчетливо. По современным оценкам

экспертов ЮНДРО и ЮНЕСКО ежегодный ущерб от землетрясений составляет несколько десятков миллиардов долларов, и во многих развивающихся странах поглощает значительную часть национального дохода. Одно катастрофическое землетрясение может унести до миллиона жизней и причинить огромный материальный ущерб. При этом негативные экономические последствия будут наблюдаться далеко за пределами территории, непосредственно пострадавшей от землетрясения. История хранит множество рассказов о сильнейших землетрясениях, в том числе о грандиозных катастрофах. Только разрушительные подземные толчки, зарегистрированные на земном шаре с начала нашего столетия, составляют около 10 тысяч.

Землетрясения возникают во многих частях света неожиданно, но довольно регулярно. Они причиняют большой урон народному хозяйству, становятся угрозой жизни людей.

В последние 50–70 лет ведущее положение как в глобальной, так и в прикладной геофизике (терминология, принятая в науках о Земле), занимают сейсмические методы. Данные сейсмологии как структурной, так и очаговой, широко используются в науках о Земле, в том числе при интерпретации наблюдений, получаемых с использованием других методов геофизического исследования. В сейсмике параметры, характеризующие распространение сейсмических волн, принято разделять на динамические и кинематические.

К *динамическим* параметрам относятся амплитуда, энергия, форма импульса и спектральные характеристики, пространственная поляризация, эффекты интерференции. *Кинематические* параметры связаны с изучением фронтов, лучей, измерением времени распространения волн.

# Глава 1

## КРАТКО О ПРИЧИНАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### 1.1. Характеристика сильных движений грунта

Глобальными природными катастрофами являются землетрясения. В глубинах Земли постоянно накапливаются упругие напряжения, и в тот момент, когда они достигают предела прочности горных пород, в последних возникает разрыв, потенциальная энергия переходит в кинетическую, напряжение снимается, а энергия в форме упругих волн распространяется во все стороны от разрыва, достигает поверхности Земли и там ощущается в форме подземного толчка или колебаний почвы.

Землетрясение – одно из самых древних катастрофических явлений на Земле. Несмотря на это, пока никто не знает, где, когда и какой силы произойдет следующее землетрясение. Землетрясение возникает при внезапном освобождении энергии, которая долгое время накапливается в результате тектонических процессов в относительно локализованных областях земной коры и верхней мантии. При этом происходит разрыв (разлом) сплошности горных пород, иногда на многие десятки километров.

Есть люди, уверяющие, что они никогда не ощущают землетрясений. Это целиком и полностью зависит от их местожительства, занятий и характера сотрясений. В одних районах земного шара землетрясения бывают часто; в других они не происходят почти никогда. Самые слабые толчки можно принять за сотрясения от проезжающего грузовика или от порыва ветра; самые сильные могут вызвать разрушение строений, дорог и мостов, срыв оползней; на море могут подняться огромные волны, которые обрушиваются на сушу и довершают начатое землетрясением разрушение.

Еще в XVIII веке Джон Мичелл пришел к выводу, что сотрясения Земли происходят вследствие прохождения через земную толщу упругих волн. Если проследить их путь назад до места их порождения, то можно установить причину возмущения. Очевидно, что для этого нужно осмотреть пораженную территорию, изучить повреждения

и опросить свидетелей; тем не менее первая серьезная попытка развить идеи Мичелла была сделана лишь почти через два столетия.

Началом современной сейсмологии считается появление в 1862 году красочно иллюстрированного двухтомника под названием: «Великое неаполитанское землетрясение 1857 года: основные принципы сейсмологических наблюдений». Это была работа ирландского инженера Роберта Маллета, совершившего экспедицию в Италию при поддержке Королевского общества. Маллет составил карту пораженной территории, разделив ее на четыре зоны. В первой зоне населенные пункты были уничтожены полностью; во второй были разрушены крупные строения и имелись человеческие жертвы; в третьей имели место лишь небольшие повреждения и не было несчастных случаев; наконец, в четвертой не было отмечено повреждений, хотя толчок и ощущался. Введенные Маллетом четыре категории составляют первую примитивную шкалу интенсивности землетрясений.

Такая классификация была, безусловно, необходима. За год-два до своего путешествия в Италию Маллет получил письмо от своего коллеги из Новой Зеландии, в котором описывалось землетрясение на юго-западе Уайрапапы в 1855 году.

«Дом... испытал весьма неожиданное сотрясение, которое явно не прекращалось и сопровождалось ужасным шумом. Я моментально вскочил и бросился бежать в сад так быстро, как это позволяли сильные колебания; при этом сила колебаний возрастала, они сопровождалась грохотом, похожим на близкую стрельбу большого числа пушек одновременно, и тучами грязной пыли из падающих дымовых труб. Вначале, пока я бежал в сад, – примерно в течение 25 секунд, – колебания носили характер резких рывков взад-вперед в северо-восточном и юго-западном направлениях; затем последовали более короткие и быстрые нарастающие колебания в перпендикулярном направлении, длившиеся примерно такое же время и оставшиеся строго в горизонтальной плоскости. Затем оба вида колебаний продолжались в виде вихревого движения, очень похожего на то, которое ощущается в тряске вагона на плохо уложенном железнодорожном полотне при очень большой скорости, когда человека кидает из стороны в сторону. Все это сопровождалось ощутимыми толчками вверх...».

В письме приводится много деталей, свидетельствующих о наблюдательности и аналитических способностях автора и его редком хладнокровии.

Сейсмические движения сложны, но поддаются классификации. Не составляет труда также уточнить оценки интенсивности по сравнению с четырьмя градациями сотрясений, использовавшимися для карты Маллета. При составлении шкал интенсивности было проявлено много изобретательности. Одной из первых широко применявшихся шкал была разработанная в Швейцарии и Италии в конце прошлого века шкала Росси – Фореля, в которой описывались десять степеней сотрясения. В большинстве современных шкал их двенадцать, и, по-видимому, это максимальное число градаций, которые можно надежно различать между собой. На сегодняшний день в англоязычных странах наиболее широко распространена модифицированная шкала Меркалли (ММ). В нее включены градации начиная от едва ощутимого толчка (ММ I) до поистине ужасающих разрушений (ММ XII). В основу положены бытовые последствия землетрясений, различить которые нетрудно даже неопытному наблюдателю.

В последние годы предприняты попытки, ввести международную шкалу, известную под названием шкалы MSK (по фамилиям инициаторов разработки Медведева, Спонеяера и Карника). Эта шкала удачна, однако при наличии нескольких критериев для одной и той же интенсивности возникает необходимость устанавливать их эквивалентность.

Напомним некоторые определения. Область, где возникает процесс разрушения, называется очагом, гипоцентром или гипоцентральной областью. Проекция очага или его области на земную поверхность называется эпицентром или эпицентральной областью. Если очагом является протяженный сброс вдоль вертикальной плоскости, то эпицентром будет длинная полоса; при наклонной плоскости сброса эпицентральной областью будет представлена широкая полоса. Диаметрально противоположное эпицентру место на земном шаре называют антицентром; расстояние от эпицентра до какой-либо точки на земной поверхности – эпицентральной. Для удаленных землетрясений оно измеряется вдоль дуги большого круга, часто в градусах ( $1^\circ = 111,1$  км). Время возникновения землетрясения называют моментом землетрясения, или временем в очаге.



Чувствительные сейсмографы ежегодно регистрируют около миллиона землетрясений, одно из них может быть катастрофическим, а около ста – разрушительной силы. Большинство землетрясений происходит на глубине до 70 км, такие землетрясения называются поверхностными. Землетрясения, которые происходят на глубине от 70 до 300 км, называют промежуточными, а глубже 300 км – глубокими. До сих пор не было зарегистрировано ни одного землетрясения глубже 720 км. Свыше 75 % энергии, выделенной при землетрясениях, принадлежит поверхностным и только 3 % – глубоким.

Различают сильные и слабые землетрясения: слабые землетрясения возникают повсеместно, но их общая энергия незначительна. Некоторые из них связаны с вулканической деятельностью. К сильным относят землетрясения с магнитудой более 5,5 балла. Анализ распределения сильных землетрясений по земному шару показывает, что примерно 75 % поверхностных, 90 % промежуточных и почти все глубокие землетрясения сосредоточены в Тихоокеанском кольце из островных дуг, глубоководных желобов и горных хребтов. Большая часть сильных землетрясений происходит также в Альпийско-Гималайском поясе. Так, очаги сильных промежуточных землетрясений были зарегистрированы в Румынии и на Гиндукуше.

Особенно много примеров связи поясов поверхностных, промежуточных и глубоких землетрясений непосредственно с тектонической деятельностью существует в Тихоокеанской области: поверхностные землетрясения обычно происходят между океаническими прогибами и ближайшей материковой или островной горной цепью, промежуточные возникают под островными горными цепями, очень же глубокие значительно удалены от океанических впадин. Арктическо-Атлантический пояс возникновения землетрясений и пояс Индийского океана, как и ответвление Тихоокеанского пояса к острову Пасхи, также совпадают с подводными горными цепями. Распределение землетрясений по энергии, географическим зонам, а также их связь со строением этих зон, то есть вся эта совокупность характеристик, объединяются понятием «сейсмичность».

Пояса сейсмической активности делят всю поверхность земного шара на блоки, внутренние части которых можно считать асейсмическими. Тихоокеанский бассейн является одним из таких блоков; остальные, наиболее крупные, имеют континентальный характер.

## 1.2. Сейсмические волны и их измерение

Скольжению пород вдоль разлома вначале препятствует трение. Вследствие этого энергия, вызывающая движение, накапливается в форме упругих напряжений пород. Когда напряжение достигает критической точки, превышающей силу трения, происходит резкий разрыв пород с их взаимным смещением; накопленная энергия, освобождаясь, вызывает волновые колебания поверхности земли – землетрясения. Землетрясения могут возникать также при смятии пород в складки, когда величина упругого напряжения превосходит предел прочности пород, и они раскалываются, образуя разлом.

Сейсмические волны, порождаемые землетрясениями, распространяются во все стороны от очага подобно звуковым волнам. Точка, в которой начинается подвижка пород называется фокусом, очагом или гипоцентром, а точка на земной поверхности над очагом – эпицентром землетрясения. Ударные волны распространяются во все стороны от очага, по мере удаления от него их интенсивность уменьшается.

Скорости сейсмических волн могут достигать 8 км/с.

### Типы сейсмических волн

Сейсмические волны делятся на волны сжатия и волны сдвига.

**Волны сжатия**, или продольные сейсмические волны, вызывают колебания частиц пород, сквозь которые они проходят, вдоль направления распространения волны, обуславливая чередование участков сжатия и разрежения в породах. Скорость распространения волн сжатия в 1,7 раза больше скорости волн сдвига, поэтому сейсмические станции регистрируют их первыми. Волны сжатия также называют первичными (***P-волны***). Скорость *P*-волны равна скорости звука в соответствующей горной породе. При частотах *P*-волн, больших 15 Гц, эти волны могут быть восприняты на слух как подземный гул и грохот.

**Волны сдвига**, или поперечные сейсмические волны, заставляют частицы пород колебаться перпендикулярно направлению

распространения волны. Волны сдвига также называют вторичными (*S-волны*).

Существует ещё третий тип упругих волн – *длинные, или поверхностные, волны (L-волны)*. Именно они вызывают самые сильные разрушения.

### **Измерение силы и воздействий землетрясений**

Для оценки и сравнения землетрясений используются шкала магнитуд и шкала интенсивности.

## **1.3. Причины землетрясений**

Существуют две основные причины землетрясений:

*Одной* из них являются процессы поверхностного характера, которые вызывают незначительные землетрясения. Эти процессы заключаются в том, что плиты, дрейфующие вдоль таких великих разломов, как, например, разлом Сан-Андреас в Калифорнии или Альпийский разлом в Новой Зеландии, действуют подобно ножницам, круша края друг друга.

*Вторая причина* отражает более глубокие процессы, происходящие в зонах вдоль краёв смещающихся плит, где рёбра этих масс земной коры погружаются в земную мантию и на глубине около 500 км повторно всасываются, поглощаются. По этой причине происходят уже более крупные землетрясения.

Верхнюю часть земной коры составляют около десятка огромных блоков – тектонических плит. Эти плиты перемещаются под воздействием конвекционных течений, поднимающихся из высокотемпературной мантии.

## **1.4. Возникновение очага**

Напряжение внутри земной коры растёт до тех пор, пока не превысит прочности самих пород. Тогда пласты горных пород разрушаются и резко смещаются. Такое резкое смещение пород называется подвижкой.

Вертикальные подвижки приводят к резкому опусканию или поднятию пород. Обычно смещение составляет лишь несколько сантиметров, но энергия, выделяемая при перемещении миллиардов тонн породы даже на малое расстояние, огромна. Накопленное напряжение в месте подвижки снимается.

Хотя землетрясения часто описывают как мгновенные события, что вполне справедливо в масштабе Земли, подвижка продолжается в течение некоторого интервала времени. Так, например, землетрясение 1906 года в Сан-Франциско длилось около 40 секунд; продолжительность великого землетрясения на Аляске в 1964 году – более 3 минут. Точка, в которой начинается подвижка, называется очагом, фокусом или гипоцентром землетрясения. Точка на земной поверхности, расположенная непосредственно над очагом, называется эпицентром. Здесь сила подземных толчков достигает наибольшей величины. Фокус землетрясения может находиться на разной глубине, поэтому землетрясения классифицируются на глубокофокусные (очаг землетрясения на глубине 300–700 км), промежуточные (глубина очага 55–300 км) и мелкофокусные (очаг от поверхности менее 55–60 км) землетрясения.

## 1.5. Сопутствующие явления

Иногда подземные толчки сопровождаются хорошо различимым низким гулом, когда частота сейсмических колебаний лежит в диапазоне, воспринимаемом человеческим ухом, иногда такие звуки слышатся и при отсутствии толчков. В некоторых районах они представляют собой довольно обычное явление, хотя ощутимые землетрясения происходят очень редко. Имеются также многочисленные сообщения о возникновении свечения во время сильных землетрясений. Общепринятого объяснения таких явлений пока нет. Цунами (большие волны на море) возникают при быстрых вертикальных деформациях морского дна во время подводных землетрясений. Цунами распространяются в океанах в пределах глубоководных зон океанов со скоростью 400–800 км/ч и могут вызвать разрушения на берегах, удаленных на тысячи километров от эпицентра.

У близлежащих к эпицентру берегов эти волны иногда достигают в высоту 30 м.

При многих сильных землетрясениях помимо основных толчков регистрируются форшоки (предшествующие землетрясения) и многочисленные афтершоки (землетрясения, следующие за основным толчком). Афтершоки обычно слабее, чем основной толчок, и могут повторяться в течение недель и даже лет, становясь все реже и реже.

## **1.6. Сейсмический шум и микросеймы**

Еще более слабые толчки и трески – сейсмический шум и микросеймы – практически непрерывны. Они порождаются целым комплексом явлений – от более сильных землетрясений до атмосферных явлений на поверхности земли и уже относятся к микросейсмическим явлениям. На сейсмограммах чутких датчиков постоянно присутствуют слабые колебания, создавая впечатление, что Земля действительно дышит.

Почти сто лет назад известным сейсмологом Вихертом было предположено, что микросейсмические колебания, регистрируемые на сейсмических станциях, вызываются ударами морских волн о берега. Затем представления о природе генерации микросейсмических колебаний значительно расширилось – они возбуждаются стоячими морскими волнами в морях и океанах, при прохождении циклонов. Детальное изучение микросейсмических колебаний в 1913 году провел академик Голицын на сейсмических станциях России в Пулково, Иркутске, Ташкенте, Тифлисе и Баку на Апшеронском полуострове. Тогда им было высказано предположение, что помимо причин, связанных с метеорологической обстановкой, микросеймы могут быть связаны и с особенностями строения земной поверхности.

Сейсмические шумы порождаются городами, транспортом – всем тем, что так или иначе связано с деятельностью человека. Если посмотреть на записи подобных колебаний, то в них отчетливо заметны «антропогенные циклы» – начало и конец рабочего дня, воскресные дни и даже перерывы на обеденное время. Шумы большого города связаны с одновременным действием большого количества

источников и именно поэтому современные сейсмические станции для регистрации землетрясений стараются выносить за пределы городских территорий, размещая в удаленных, горных местностях.

В зависимости от природы возникновения сейсмический шум может оказаться полезен для задач прогноза сильных землетрясений. Появились и используются эффективные методы по данным регистрации микросейсм для определения частотного спектра грунтов или собственных колебаний уже построенного сооружения. Подобные эксперименты проводились автором совместно с учеными из Израиля для оценки сейсмической опасности территории города Ашхабада в Туркменистане.

Сейсмический шум от самых различных источников «несет» в себе характеристики места, где он регистрируется – сведения о характерных частотах колебаний грунтов, их, как называют ученые, динамических свойствах – способности усиливать амплитуды колебаний, или, наоборот, уменьшать и многое другое. В самом деле, наблюдая микросейсм можно заблаговременно оценить свойства грунтов, на которых предполагается проведение строительных работ. Однако регистрация шумов может оказаться полезной и для оценки сейсмической устойчивости уже построенных зданий – они отражают характерные периоды сотрясений всего комплекса, то есть грунтов, фундамента и самого здания. Зная диапазон периодов наиболее опасных колебаний от землетрясений, и сравнивая его с выявленными собственными микроколебаниями сооружения, можно заблаговременно принять меры к увеличению сейсмической сопротивляемости здания.

## **1.7. Регистрация землетрясений**

Прибор, записывающий сейсмические колебания, называется сейсмографом, а сама запись – сейсмограммой. Сейсмограф состоит из маятника, подвешенного внутри корпуса на пружине, и записывающего устройства.

Одно из первых записывающих устройств представляло собой вращающийся барабан с бумажной лентой. При вращении барабан постепенно смещается в одну сторону, так что нулевая линия записи на бумаге имеет вид спирали. Каждую минуту на график

наносятся вертикальные линии – отметки времени; для этого используются очень точные часы, которые периодически сверяют с эталоном точного времени. Для изучения близких землетрясений необходима точность маркировки – до секунды или меньше.

Во многих сейсмографах для преобразования механического сигнала в электрический используются индукционные устройства, в которых при перемещении инертной массы маятника относительно корпуса изменяется величина магнитного потока, проходящего через витки индукционной катушки. Возникающий при этом слабый электрический ток приводит в действие гальванометр, соединенный с зеркальцем, которое отбрасывает луч света на светочувствительную бумагу записывающего устройства. В современных сейсмографах регистрация колебаний ведется в цифровом виде с использованием компьютеров.

## 1.8. Прогноз землетрясений

Многочисленные свидетельства из разных частей света говорят, что многие животные (собаки, куры, свиньи, крысы и т. п.) проявляют признаки беспокойства за несколько часов до землетрясения, местные жители в сейсмоопасных районах доверяют этим признакам.

В конце прошлого века группа известных западных сейсмологов провела сетевые дебаты, главным вопросом которых был «является ли достоверный прогноз индивидуальных землетрясений реалистичной научной целью?». Все участники дискуссии, несмотря на значительные расхождения в частных вопросах, согласились с тем, что:

- 1) детерминистические предсказания отдельных землетрясений с точностью, достаточной для того, чтобы можно было планировать программы эвакуации, нереальны;
- 2) по крайней мере некоторые формы вероятностного прогноза текущей сейсмической опасности, основанные на физике процесса и материалах наблюдений, могут быть оправданы.

Даже если бы точность измерений и несуществующая пока физико-математическая модель сейсмического процесса дали

возможность с достаточной точностью определить место и время начала разрушения участка земной коры, магнитуда будущего землетрясения остается неизвестной. Дело в том, что *все* модели сейсмичности, воспроизводящие график повторяемости землетрясений, содержат тот или иной генератор стохастичности, создающий в этих моделях динамический хаос, описываемый лишь в вероятностных терминах. Более явно источник стохастичности качественно можно описать следующим образом.

Пусть распространяющийся во время землетрясения фронт разрушения подходит к участку повышенной прочности. От того, будет разрушен этот участок или нет, зависит магнитуда землетрясения. Например, если фронт разрушения пройдет дальше, землетрясение станет катастрофическим, а если нет, останется небольшим. Исход зависит от прочности участка: если она ниже некоторого порога, разрушение пойдет по первому сценарию, а если выше, по второму. Возникает *эффект бабочки*: ничтожно малое различие в прочности или напряжениях приводит к макроскопическим последствиям, которые нельзя предсказать детерминистически, поскольку это различие меньше любой точности измерений. А предсказание места и времени землетрясения с неизвестной и, возможно, вполне безопасной магнитудой не имеет практического смысла, в отличие от расчёта вероятности того, что сильное землетрясение произойдет.

Тем не менее китайские учёные, казалось бы, достигли огромных успехов в предсказании землетрясений – они в течение нескольких лет мониторили наклон поверхности, уровень грунтовых вод, а также содержание радона (газа) в горных породах. По предположению исследователей, все эти параметры, кроме сезонных изменений, а также многолетнего тренда, должны резко меняться за несколько недель или месяцев перед крупным землетрясением. Учёные предсказали землетрясение 4 февраля *1975 года* в густонаселённом *Ляонине*, жертвами которого могли бы стать миллионы человек. Однако вскоре, как по иронии судьбы, случилось *Таншаньское землетрясение* (магнитудой 8,2) 27 июля *1976 года*, которое предсказано не было, и количество жертв (более 650 тысяч) было одним из самых больших в истории наблюдений.

Отношение ряда ученых к проблеме прогнозирования землетрясений весьма неоднозначно. В настоящее время мировое научное



сообщество, разочарованное многолетним «застоем» в развитии новых технологий прогнозирования землетрясений, разделилось на «скептиков» и «оптимистов». Основная позиция «скептиков» – невозможно краткосрочно прогнозировать землетрясения, так как многолетние исследования в этой области не увенчались успехом. Позиция же «оптимистов» основывается на диалектическом понимании эволюционного научного развития, в котором невозможное «вчера», становится очевидным «сегодня», благодаря открытию новых законов природы, новым знаниям и технологиям.

В 2003 году был открыт принципиально новый физический эффект трехмерного изменения гравитационного поля перед сильными землетрясениями, на огромных расстояниях от эпицентра землетрясений (от 1000 до 10000 км). Этот эффект лег в основу принципиально нового физического инструмента – торсионного детектора трехмерных гравитационных вариаций, на который был выдан патент (Патент PCT: International Patent, PCT, WO 2005/003818 A1, Geneva, 13/01/2005). На основе указанного детектора была разработана и изготовлена станция прогнозирования ATROPATENA, автоматически и автономно регистрирующая трехмерные изменения гравитационного поля и передающая эту информацию в Центральную базу данных, размещенную в США (La Habra).

С 2007 года, после начала работы первой станции ATROPATENA-AZ, краткосрочные прогнозы землетрясений регулярно поступали в Президиум МАН (Международная академия наук (здоровье и экология)), Австрия, Инсбрук), в Пакистанскую академию наук (Исламабад, Пакистан) и Университет Гаджа Мада (Джокьякарта, Индонезия). В 2009 году Глобальная сеть прогнозирования землетрясений начала полноценно функционировать в режиме краткосрочного прогнозирования землетрясений и оперативной передачи этой информации странам-участникам Глобальной сети (рисунок 1). Этот факт был широко освещен в российской и международной печати. Наряду со странами, участвующими в работе Глобальной сети (Австрия, США, Индонезия, Пакистан, Азербайджан) в качестве ассоциативных партнеров выступили организации ряда стран: Турция (SETAC, VisioTek), Казахстан (НПК Прогноз), Узбекистан (Институт сейсмологии).



Международная станция по прогнозированию землетрясений Atropatena-AZ1 (Азербайджан)



Международная станция по прогнозированию землетрясений Atropatena-Pk (Пакистан)



Международная станция по прогнозированию землетрясений ATROPATENA-ID (Джокьякарта, Индонезия)



Международная станция по прогнозированию землетрясений Atropatena Crystal (Kh10) – Технологический бренд (Азербайджан)



Международная станция по прогнозированию землетрясений Atropatena Crystal (Kh10) – (Азербайджан)



Международная станция по прогнозированию землетрясений Atropatena Crystal (Kh10) – (Азербайджан)

Рисунок 1 – Международные станции по прогнозированию землетрясений

Основной целью GNFE является краткосрочное прогнозирование землетрясений и оперативное оповещение стран, входящих в состав Глобальной сети о прогнозируемых сильных толчках.

Странами-участницами (полноправные члены-владельцы станций ATROPATENA) и партнерами GNFE (ассоциативные

члены, имеющие соглашения о сотрудничестве) являются Англия, Австрия, США, Индонезия, Азербайджан, Пакистан, Германия, Турция, Казахстан, Узбекистан.

### **Структура GNFE**

- Высшим руководящим органом GNFE является Правление, в состав которого входят представители полноправных и ассоциативных членов GNFE. Правлением избирается Президент GNFE. В настоящее время Президентом GNFE является основатель этой организации, вице-президент WOSCO (Англия, Лондон), Всемирная организация по научному сотрудничеству, профессор, доктор геолого-минералогических наук Эльчин Нусрат оглы Халилов.
- GNFE зарегистрирована в Англии (Лондон), где размещен Секретариат этой организации.
- Европейское отделение GNFE зарегистрировано в Германии (Мюнхен), где размещена Главная штаб-квартира GNFE.
- Центр управления прогнозами GNFE – Научно-исследовательский институт прогнозирования и изучения землетрясений размещен в г. Баку (Азербайджан).
- Центральная база данных GNFE размещена в г. Ла-Хабра (США).
- Представительства GNFE открыты в США (г. Миннеаполь, штат Миннесота) и Турции (г. Анкара).
- Научно-производственный центр по производству станций прогнозирования землетрясений ATROPATENA находится в г. Стамбуле (Турция).
- Станции прогнозирования землетрясений ATROPATENA размещены в Пакистане (г. Исламабад), Азербайджане (г. Баку) и Индонезии (г. Джокьякарта).

### **Международные инициативы GNFE**

- В марте 2009 года GNFE наряду с WOSCO Всемирная организация по научному сотрудничеству выступила в поддержку инициативы по подготовке Международного комюнике по проблемам глобальных изменений геологической среды GEOCHANGE и начала акции сбора подписей

ученых, поддерживающих это коммюнике. К середине апреля 2010 года Международное коммюнике GEOCHANGE подписали более 100 ученых из более чем 30 стран мира.

- 5 декабря 2009 года по инициативе Глобальной сети прогнозирования землетрясений GNFE и Всемирной организации по научному сотрудничеству WOSCO на основе инициативной группы, подписавшей коммюнике, был создан Международный комитет по проблемам глобальных изменений геологической среды GEOCHANGE. В состав Международного комитета GEOCHANGE вошли ученые из более чем 25 стран мира

Для повышения точности прогноза землетрясений необходимо лучше представлять механизмы накопления напряжений в земной коре, крипа и деформаций на разломах, выявить зависимости между тепловым потоком из недр Земли и пространственным распределением землетрясений, а также установить закономерности повторяемости землетрясений в зависимости от их магнитуды.

## Глава 2 СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

### 2.1. Общие положения

**Сейсмостойкое строительство** – раздел гражданского строительства, специализирующийся в области изучения поведения зданий и сооружений под сейсмическим воздействием в виде сотрясений земной поверхности, потери грунтом своей несущей способности, волн цунами и разработки методов и технологий строительства зданий, устойчивых к сейсмическим воздействиям.

Сейсмостойкое строительство может рассматривать любой строительный объект как фортификационное сооружение, но предназначенное для обороны от специфического противника – землетрясения и/или вызванных землетрясением катастроф (например, цунами). В обоих случаях основной принцип проектирования объектов: замедлить или ослабить возможную атаку, вплоть до невозможности победы для атакующего.

Главные задачи сейсмостойкого строительства:

- знать и понимать, что происходит при взаимодействии строительных объектов с трясущимся основанием;
- предвидеть последствия возможного сейсмического воздействия;
- проектировать, возводить и поддерживать в надлежащем состоянии сейсмостойкие объекты.

Сейсмостойкое сооружение не обязательно должно быть *громоздким* и *дорогим* как, например, пирамида Кукулькана в городе Чичен-Ица.

В настоящее время наиболее эффективным и экономически целесообразным инструментом в сейсмостойком строительстве является *вибрационный контроль* сейсмической нагрузки и, в частности, сейсмическая изоляция, позволяющая возводить сравнительно легкие и недорогие постройки.

## 2.2. Основы инженерной сейсмологии

Сейсмология (от сейсмо- и -логия), раздел геофизики, изучающий землетрясения, их связь с тектоническими процессами и возможность предсказания. Данные сейсмологии используются для исследования внутреннего строения Земли и решения задач по сейсмическому районированию. Как самостоятельная наука существует со 2-й половины XIX века. Значительный вклад в сейсмологию внесли: Э. Вихерт, Б. Гутенберг (Германия), Дж. Милн, Х. Джеффрис (Великобритания), К. Буллен (Австралия), Ф. Омори, А. Имамура, К. Вадати (Япония), А. Мохоровичич (Югославия), Б.Б. Голицын, И.В. Мушкетов (Россия).

Сейсмология изучает землетрясения, их механизмы и последствия, распространение сейсмических волн, а также все виды движений земной коры, которые регистрируются сейсмографами на суше и на дне океанов и морей. Наиболее активные землетрясения наблюдаются в ослабленных зонах вдоль границ тектонических плит. При этом возбуждаются три типа сейсмических волн: продольные (P), поперечные (S) и поверхностные (волны Лява и Рэлея). Сильные землетрясения могут также возбуждать свободные колебания всей Земли.

Выбором сейсмически безопасных мест для строительства проектируемых сейсмостойких сооружений занимается инженерная сейсмология. Реальной методологии точного прогноза времени и места землетрясений пока не существует. Известно, что наиболее сильные землетрясения сопровождают процесс субдукции (поддвига) в глубоководных желобах или движения по трансформным разломам. Это позволяет прогнозировать районы возможных землетрясений. Информация о силе ожидаемых толчков крайне необходима для определения возможной интенсивности сейсмических воздействий на такие сооружения, как ядерные реакторы, плотины, мосты и здания.

Сейсмические методы используются для изучения внутреннего строения Земли в целом и ее структуры на разных глубинах. Следует отметить, что на основе результатов сейсмических исследований установлено, что Земля состоит из ядра, мантии и земной коры. Использование цифровых сейсмографов сыграло огромную

роль в изучении земных недр и позволило регистрировать землетрясения. По данным об изменениях скоростей волн была составлена трехмерная схема строения мантии. Структура верхней мантии, определяемая по скоростям сейсмических волн, различна для районов срединно-океанических хребтов и материков и соответствует распределению теплового потока. Сходная картина в изменениях скоростей волн отмечается и в нижней мантии, однако они не коррелируют с макрорельефом поверхности Земли.

### 2.3. Сейсмическое районирование

Сейсмическое районирование (а. seismic zoning; н. Gebietsaufteilung in Erdbebenzonen; ф. zonation sismigue; и. division en regiones sismicos) – деление территории на районы с разной степенью интенсивности ожидаемых землетрясений. Данные сейсмического районирования используются при проектировании и строительстве сейсмостойких сооружений и решении других практических задач на сейсмически опасной территории. Для составления карт сейсмического районирования используются исторические данные и инструментальные наблюдения за землетрясениями, геолого-тектонические и геофизические карты, данные о движениях блоков земной коры. На первом этапе выделяются зоны возможного возникновения очагов землетрясения (зоны ВОЗ) с различными глубинами очагов. Наибольшую опасность представляют землетрясения с очагами в пределах земной коры (на глубине от 3 до 30–50 км). Зоны ВОЗ классифицируются по максимально возможным магнитудам (энергиям) землетрясений, например, на карте сейсмического районирования СССР выделены зоны с  $M_{\max} \geq 8,1$ ;  $8,0 > M \geq 7,1$ ;  $7,0 > M \geq 6,1$ .

Эффект землетрясений на поверхности Земли обычно выражают в баллах сейсмической шкалы или в количественных характеристиках интенсивности колебаний (в величинах ускорений и скорости колебаний частиц грунта). На картах сейсмического районирования выделяются зоны с интенсивностью землетрясений 9, 8, 7, 6, 5 и менее баллов или проводятся изолинии с амплитудами эффективных пиковых значений ускорений 0,05 g, 0,10 g, 0,20 g, 0,40 g (g – ускорение силы тяжести).

Карты сейсмического районирования для всей страны составляются в масштабе 1:5000000–1:1000000, для отдельных регионов карты детального сейсмического районирования – в масштабе 1:500000–1:100000.

Эффект проявления интенсивности землетрясений сильно зависит от инженерно-геологических условий строительства и соотношения собственных периодов колебаний сооружений с резонансными колебаниями слоёв грунта в основании сооружения. Эти особенности не учитываются на мелкомасштабных картах сейсмического районирования, поэтому для городов и пунктов строительства отдельных ответственных сооружений составляются карты сейсмического микрорайонирования.

## 2.4. Сейсмическая разведка

Сейсмическая разведка, сейсморазведка (а. seismic survey; н. seismisches Prospektieren, Seismik; ф. prospection seismique, exploration seismique; и. prospeccion sismica, exploracion sismica, estudio sismografico) – совокупность геофизических методов разведки, основанных на возбуждении и регистрации сейсмических волн разных типов с целью изучения строения, вещественного состава и напряжённого состояния земных недр.

Искусственно возбуждённые сейсмические волны, распространяясь вглубь Земли, встречают на своём пути границы пород разного состава и с различными физико-механическими свойствами. На каждой границе часть сейсмической энергии отражается, а часть преломляется и уходит на большие глубины. Отражённые волны возвращаются к поверхности вблизи пункта возбуждения (ПВ), а преломлённые, проходя по слоям с повышенной скоростью, – на значительных удалениях от ПВ.

Возбуждение сейсмических колебаний осуществляется на суше с помощью взрывов, механических ударов или вибраторов, на море – пневматических или электроискровых источников (см.: Невзрывные источники сейсмических колебаний). Регистрация колебаний производится группами сейсмоприёмников. Источники и приёмники располагаются вдоль прямолинейных или



изломанных профилей либо по площади. Наибольшее распространение получили системы наблюдений, в которых многоканальная расстановка сейсмоприёмников с большим перекрытием перемещается вдоль профиля после каждого цикла возбуждения и приёма колебаний. Механические колебания почвы, преобразованные сейсмоприёмниками в электрический сигнал, по соединительным линиям (сейсмическим косам) или по радио передаются на передвижную сейсморазведочную станцию. Здесь они усиливаются, частично отфильтровываются от помех и записываются в цифровом виде на магнитную плёнку. Затем эти плёнки обрабатываются на ЭВМ в экспедиционных и региональных вычислительных сейсмических центрах. По серии последовательно зарегистрированных и обработанных сейсмических волн строится сейсмический разрез земной коры в месте наблюдения, по картам отдельных сейсмических границ выявляются погребённые структуры с амплитудами до нескольких десятков метров. Измерение амплитуд, частот и других параметров колебаний позволяет определять свойства, вещественный состав и состояние пород.

В основном при сейсмической разведке используются продольные волны, реже – поперечные и обменные волны. Наибольшее распространение получил отражённых волн метод (МОВ), позволяющий картировать границы с точностью до 1–2 % на глубинах до 7–10 км.

Преломлённых волн метод (МПВ) обладает большей глубиной, но меньшей точностью и разрешающей способностью, позволяя изучать только слои с повышенной скоростью сейсмических волн.

Корреляционный метод преломлённых волн (КМПВ) и глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ) стали основными при региональных исследованиях континентов и океанов. Для поисков и разведки полезных ископаемых применяются модификации МОВ в виде суммирования полезных сигналов, отразившихся от общей глубинной точки (ОГТ); объёмной сейсморазведки, базирующейся на использовании площадных систем наблюдений; многоволновой сейсморазведки, в которой комплексируют возбуждение и регистрацию волн разных типов, и др. Методика применения этих способов

имеет свою специфику в нефтегазовой, угольной и рудной сейсмической разведке.

Условно к сейсмической разведке относят также пьезоэлектрический метод (ПЭМ), основанный на изучении электромагнитного поля, возникающего вследствие пьезоэлектрического эффекта, возбуждаемого проходящими сейсмическими волнами. ПЭМ используется для поисков пегматитов. Для увеличения надёжности геологической интерпретации, увеличения разрешающей способности и точности сейсмической разведки привлекаются данные других геофизических методов разведки (гравиметрической, магнитной и электрической).

По условиям проведения наблюдений различают наземную, морскую, скважинную, шахтную сейсмическую разведку. Детальным изучением строения геологического разреза на малых глубинах и свойств грунтов занимается инженерная сейсморазведка.

Сейсмическая разведка применяется для сейсмогеологического районирования территории и комплексов горных пород; картирования геологических границ в осадочном чехле и консолидированной коре; изучения рельефа поверхности кристаллического фундамента; поиска структурных и других ловушек нефти и газа; поисков рудных тел; прогнозирования строения геологического разреза, состава и флюидного насыщения пород; выявления тектонических нарушений и карстовых полостей; определения уровня подземных вод и разведки их месторождений; изучения напряжённого состояния и изменений свойств геологической среды во времени и др.

Применение отражённых сейсмических волн предложено американским учёным Р. Фессенденом в 1913 году, а также независимо советским инженером В.С. Воюцким в 1923 году, практическое использование МОВ началось с конца 1920-х годов. Модификация ОГТ предложена американским геофизиком Г. Мейном в 1962-м. Преломлённые волны предложил использовать немецкий геофизик Л. Минтроп в 1919-м, КМПВ и ГСЗ разработаны советским учёным Г.А. Гамбурцевым в 1939 году. Применение ПЭМ предложено в 1959 году советскими геофизиками М.П. Воляровичем, Э.И. Пархоменко и др.

## 2.5. Сейсмические станции

*Сейсмические станции* – станции для регистрации колебаний земной поверхности, вызываемых землетрясениями, а также для первичной обработки полученных записей. В зависимости от решаемых задач сейсмические станции подразделяются на телесеismicкие и региональные.

*Телесеismicкие* станции предназначены для регистрации сейсмических сигналов в основном на эпицентральной дистанции свыше 2000 км. Эти станции снабжены стандартной сейсмической аппаратурой: короткопериодными сейсмографами высокой чувствительности в полосе пропускания 10–0,7 Гц; широкополосными сейсмографами средней чувствительности с полосой пропускания 10–0,05 Гц; часть станций оснащена длиннопериодными сейсмографами средней чувствительности с полосой пропускания 0,2–0,015 Гц.

*Региональные* сейсмические станции предназначены для регистрации близких землетрясений с эпицентральной дистанциями до 2000 км. Эти станции оснащены короткопериодной аппаратурой, а также регистрируют сильные движения в полосе пропускания 10–0,1 Гц. Мировая сеть насчитывает (1974) около 2000 сейсмических станций (в том числе свыше 200 на территории СССР).

Все сейсмические станции мира ведут регистрацию землетрясений по единому времени (среднее гринвичское), проводят первичную обработку сейсмограмм (измеряются моменты вступления различных сейсмических волн и их динамические параметры). Эти сведения по государственным каналам связи направляются в соответствующие центры обработки; они являются исходными данными для сейсмологических бюллетеней. Сейсмические станции работают в соответствии с инструкциями и руководствами, подготовленными как в центрах национальных сейсмических служб, так и в международных сейсмологических организациях.

## 2.6. Анализ существующих методов расчета железобетонных конструкций на сейсмические воздействия

### Этапы развития теории сейсмостойкости. Статическая теория определения сейсмических сил Ф. Омори

Статическая теория определения сейсмических сил была разработана вначале XIX века в Японии и основывалась на гипотезе об абсолютной недеформируемости здания во время землетрясения, то есть здание представляет собой абсолютное твердое тело, жестко заделанное в основание. При колебаниях грунта по некоторому закону  $y_0(t)$  здание совершает колебания по тому же закону, что и основание, то есть горизонтальные поступательные перемещения, скорости и ускорения всех точек здания одинаковы и равны соответствующим характеристикам колебания грунта. Предполагалось, что сооружение не имеет вращательных перемещений.

Автор теории Ф. Омори полагал, что ускорение  $\ddot{y}_{0 \max}$  так же, как и ускорение силы тяжести, постоянно действует на сооружение, поэтому сейсмическая сила, под которой понимались сила инерции  $S_{\max}$ , возникающая в любой точке сооружения весом  $Q$ , действует на здание статически. Вследствие этого значение максимальной сейсмической силы  $S_{\max}$ , возникающей в них, определялось по общим правилам строительной механики, используя формулы статики,

$$S_{\max} = \frac{\ddot{y}_{0 \max}}{g} Q = k_c Q \quad (1)$$

где  $k_c$  – коэффициент сейсмостойкости, принимаемый в зависимости от расчетной силы землетрясения. Для 7-, 8-, 9-балльного землетрясения этот коэффициент соответственно равен 0,025; 0,05 и 0,1;

$Q$  – вес сооружения определяется по формуле  $Q = mg$ ,

где  $m$  – масса сооружения;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести.

Все это предопределило справедливость названия разработанной Ф. Омори теории **статической теории сейсмостойкости**.

## Динамическая теория расчета сейсмостойкости Н. Монобе

Следующим этапом в развитии теории сейсмостойкости является динамическая теория Н. Монобе, в которой он отказывается от гипотезы об абсолютной недоформируемости сооружения, а сейсмические силы, действующие на систему, определяют с учетом ее упругих свойств.

В качестве расчетной модели здания была выбрана линейно-упругая система с жидкостью  $K$  и одной сосредоточенной массой  $M$ , жестко заделанная в основание. Предполагалось, что основание сооружения совершает вынужденные колебания по установившемуся гармоническому закону  $y_0(t)$  с периодом  $T_0$  без учета диссипации энергии.

Максимальные значения сейсмической силы определялись по формуле

$$S_{\max} = \beta_1 k_c Q, \quad (2)$$

где  $Q = mg$  – вес системы;

$$k_c = \frac{\ddot{y}_0}{g} - \text{коэффициент сейсмостойкости};$$

$\beta_1$  – динамический коэффициент, определяемый по формуле

$$\beta_1 = \frac{1}{1 - T^2/T_0^2}, \quad (3)$$

где  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  – период собственных колебаний сооружения.

## Динамическая теория расчета сейсмостойкости К.С. Завриева

Впервые идея о том, что главной причиной сейсмических разрушений зданий являются их колебания по собственным формам в начальной стадии землетрясения, высказана в 1927 году советским ученым К.С. Завриевым. Впоследствии эта теория была развита другими учеными и получила название **динамической теории расчета сейсмических сил**.

Принимая ту же расчетную модель, что и Н. Монобе, и рассматривая сейсмические перемещения грунта как незатухающие колебания по гармоническому закону косинуса, К.С. Завриев получил формулу для определения максимальной сейсмической силы, в которой коэффициент динамичности был вдвое выше, чем у Н. Монобе.

Максимальные значения сейсмической силы определялись по формуле

$$S_{\max} = \beta_1 k_c Q, \quad (4)$$

где  $\beta_2 = \frac{1}{1 - T^2 / T_0^2}$  – динамический коэффициент.

### Спектральный метод расчета сейсмостойкости

В 1934 году М.А. Био предложил определять сейсмические силы на основе разработанного им **спектрального метода расчета**.

В отличие от своих предшественников величину сейсмической нагрузки, действующую на линейно-упругую систему с одной степенью свободы, М.А. Био определял не по гармоническому закону движения основания, а с использованием полученного им стандартного спектра ускорений, построенного с использованием экспериментально измеренных ускорений маятников, обладающих разными периодами собственных колебаний ( $T = 0,1 \div 2,4$  сек), соответствующих реальным зданиям.

Величина максимальной сейсмической силы при колебании основания с ускорением по произвольному закону  $\ddot{y}_0(t)$  определяется по формуле

$$S_{\max} = m\ddot{z}(t), \quad (5)$$

где  $m$  – масса сооружения;

$\ddot{z}(t)$  – спектр ускорений, представляющих собой зависимость максимальных ускорений от периода собственных колебаний  $T$  системы (маятника).

### **Национальные нормы расчета сейсмостойкости зданий и сооружений**

В настоящее время около 30 наиболее экономически развитых стран мира (в том числе Россия) располагают национальными нормами, регламентирующими основные правила строительства в сейсмически опасных районах. Основываясь на результатах большого количества теоретических и экспериментальных исследований, подавляющее большинство норм расчета зданий на сейсмическую нагрузку ведут на эквивалентную статическую нагрузку на основе динамического метода расчета.

В процессе расчета зданий на эквивалентную статическую нагрузку, основанного на спектральном методе расчета, определяются сейсмические нагрузки, приходящиеся на каждый элемент, и сравниваются с их несущей способностью по общим правилам расчета железобетонных конструкций. Такой подход к расчету сейсмостойкости зданий и сооружений получил название условно-статического метода расчета на сейсмические воздействия.

#### **Нормы России**

В настоящее время расчет зданий и сооружений на воздействие сейсмических нагрузок производится в соответствии со СНиП II-7-81, в основу которых заложена резонансно-колебательная концепция, суть которой состоит в том, что причиной

сейсмических разрушений зданий являются их резонансные колебания по собственным формам.

В качестве нормативной расчетной схемы каркасных зданий применяется линейно-упругая консольная система с  $n$ -сосредоточенными массами (в зависимости от этажности), жестко заделанной в основание и нагруженной горизонтальными силами, приложенными к центрам масс. Движение системы раскладывается по формам собственных колебаний. Сейсмическая нагрузка определяется отдельно для каждой формы собственных колебаний.

Полная сейсмическая нагрузка  $S_{ik}$  определяется в предположении упругого деформирования конструкций с введением условных эмпирических коэффициентов, учитывающих различные формы разрушения элементов системы, образования шарниров и особенностей конструктивной схемы сооружения по формуле

$$S_{ik} = k_1 k_2 S_{oik}, \quad (6)$$

где  $k_1 = 0,25$  – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий особенности конструктивного решения зданий и сооружений;

$S_{oik}$  – расчетная сейсмическая нагрузка, соответствующая  $i$ -й форме собственных колебаний здания, приложенная к массам  $m_k$ , определяется по формуле

$$S_{oik} = Q_k \alpha \beta_i k_\psi \eta_{ik}, \quad (7)$$

где  $Q_k = m_k g$  – все здания, соответствующий ... массе;

$\alpha$  – коэффициент сейсмичности, равный 0,1; 0,2; 0,4 в зависимости от расчетной сейсмостойкости в 7, 8, 9 баллов, соответственно;

$\beta_i = A/T_i$  – коэффициент динамичности, изменяющийся в зависимости от  $i$ -го тона периода собственных колебаний  $T_i$  здания и категории грунта, в пределах 0,8÷2,7;

$k_\psi$  – коэффициент демпфирования;



$\eta_{ik}$  – коэффициент, зависящий от всех учитываемых в расчете форм собственных колебаний, определяется по формуле

$$\eta_{ik} = \frac{x_i(x_k) \sum_{j=1}^n Q_j x_i(x_j)}{\sum_{j=1}^n Q_j x_j^2(x_j)}, \quad (8)$$

где  $x_k$  и  $x_j$  – расстояния между точками, в которых приняты сосредоточенные массы, и верхним обрезаом фундамента.

От действия расчетных сейсмических нагрузок  $S_{ik}$  статическим расчетом по правилам строительной механики находят внутренние усилия  $N_i$  в сечениях конструкций зданий, соответствующие  $i$ -й форме собственных колебаний отдельно по каждой форме, а полное расчетное усилие  $N_p$  определяется в виде

$$N_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2}, \quad (9)$$

где  $n$  – число учитываемых в расчете форм собственных колебаний. Для систем с одной степенью свободы  $n = 1$ .

Дополнительный коэффициент условий работы  $m_{kp}$  учитывает кратковременность и малое число повторений сейсмических нагружений.

### ***Достоинства и недостатки отечественного нормативного метода расчета***

Основное достоинство отечественного нормативного метода расчета сейсмостойкости заключается в его простоте, когда для расчета железобетонных конструкций используются хорошо известные инженеру приемы и правила, применяемые для обычных статических нагружений.

Главный недостаток отечественного нормативного метода заключается в том, что заложены нереальные основы и ошибочная технология реализации этих основ, то есть философия проектирования предполагает локальные разрушения и неупругие деформации, а методы расчета фактически их не допускают.

Кроме этого, отечественные нормы имеют и некоторые другие недостатки:

- локальные повреждения и неупругие деформации в железобетонных элементах учитываются условными эмпирическими коэффициентами как при определении сейсмической нагрузки, так и при расчете прочности отдельных элементов. Эти коэффициенты не поддаются проверке или уточнению опытным путем, потому что каждый из них не является физическим параметром, который можно изменить или вычислить по результатам измерений. Они не учитывают изменчивости физических деформационных характеристик железобетонных элементов и системы в целом вплоть до наступления предельного состояния;

- с одной стороны, нормы допускают в расчетах на сейсмостойкость применять расчетную модель здания в виде линейно-упругой консольной системы с жесткой заделкой в основании, с другой – образование неупругих остаточных деформаций, трещин, повреждений отдельных элементов, что прямо противоречит первому положению;

- при определении коэффициента  $\beta_i$  не уточняется, какую из отличающихся в несколько раз опытных величин периодов собственных колебаний здания  $T$ , нужно брать: начальную, соответствующую микросейсмическим колебаниям, или промежуточную, соответствующую, например, началу развития пластических деформаций;

- неточный учет вертикальной составляющей;

- недостаточный учет волновых процессов и неточное определение влияния грунтов на сейсмические воздействия и др.

### **Проект новой редакции СНиП**

При расчете на сейсмические воздействия используются условно статический и динамический методы расчета.

Условно статический расчет производится по обычным правилам на условную сейсмическую нагрузку, при этом принимаются линейно-упругие модели конструктивных систем.

Полная сейсмическая нагрузка определяется по формуле

$$S_{ik} = \rho \cdot S_{oik}, \quad (10)$$

где  $\rho$  – коэффициент редукции, учитывающий неупругие деформации, вводится при определении усилий в элементах системы

$$\rho = \frac{1}{\mu}, \quad (11)$$

где  $\mu$  – деформационная характеристика элемента в предельном состоянии.

Условия прочности и деформативности для каждого элемента конструктивной системы определяются по формуле

$$R \leq R_n; \quad (5.6.12)$$

$$\delta \leq \delta_n, \quad (5.6.13)$$

где  $R$  и  $\delta$  – усилие и деформация элемента от внешней нагрузки;

$R_n$  и  $\delta_n$  – предельно допустимые усилия и деформации для рассматриваемого элемента.

Несущая способность железобетонных элементов определяется с учетом динамического малоциклового характера сейсмических воздействий, для чего расчетное сопротивление бетона умножается на дополнительный коэффициент условия работы  $\gamma = 0,7 \div 1,0$ .

### Нормы США

В основу американских норм по расчету и проектированию строительства в сейсмических районах, принятых по Единому строительному коду США, введенных в 1977 году, заложено неупругое деформирование основных несущих железобетонных конструкций.

Полная горизонтальная сейсмическая нагрузка в основании здания определяется по формуле

$$S_{\max} = Q C_S, \quad (14)$$

где  $Q$  – нагрузка на уровне обреза фундамента;

$C_s$  – коэффициент сейсмической нагрузки в основании сооружения, определяется по расчетному спектру в зависимости от периода основного тона колебаний по формуле

$$C_s = \frac{1,2GA}{RT^{2/3}}, \quad (15)$$

где  $G = 1 \div 1,5$  – коэффициент, учитывающий тип грунтовых условий, при этом для площадок со скальными и плотными грунтами  $C_s \leq 2,5 A/R$ , а с мягкими –  $C_s \leq 2,5 A/R$ ;

$A$  – приведенное максимальное ускорение основания, определяемое по картам сейсмического районирования;

$R$  – понижающий коэффициент, зависящий от конструктивной схемы здания;

$T$  – период основного тона собственных колебаний

### **Международные нормы ЕВРОКОД-8 и МОДЕЛЬ-КОД ЕКБ**

При расчете сейсмической нагрузки по международным нормам ЕВРОКОД-8 и МОДЕЛЬ-КОД ЕКБ проверка прочности элементов конструкции производится, исходя из условия, что во всех практических областях конструкции усилия сопротивления должны быть больше внешних усилий. Усилия сопротивления определяются с учетом циклического деформирования, вызванного расчетным сейсмическим воздействием. В случае, если специальные данные отсутствуют, расчетные значения усилий сопротивления могут рассматриваться как при монотонном нагружении. Железобетонные конструкции по неупругой деформативности разделяются на три класса – низкий, средний и высокий.

Расчетная сейсмическая нагрузка определяется по формуле

$$S = \frac{a\beta\eta G}{k}, \quad (16)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$  – коэффициенты, учитывающие нормируемый уровень максимальных ускорений движения основания; увеличение ускорений движения системы с несколькими степенями свободы;

$G$  – собственный вес;

$k = 1,5 \div 4$  – коэффициент, учитывающий особенности работы конструктивной системы здания, принимаемый в зависимости от класса неупругой деформативности железобетонных элементов и класса регулярности системы.

### **Нормы Японии**

По японским нормам сейсмический расчет конструкций должен обеспечивать их безопасность во время землетрясения и эксплуатационную пригодность после землетрясения.

Расчетное сейсмическое воздействие должно определяться в соответствии с типом конструкции и характеристиками района строительства и отвечать наибольшему землетрясению, которое может иметь место в рассмотренном районе в течении всего срока эксплуатации конструкции. Причем рассматривается только горизонтальная составляющая сейсмического воздействия.

### **Ударно-волновая концепция С.Б. Смирнова**

Обобщив и сопоставив всю имеющуюся информацию о закономерностях сейсмических и других разрушений, С.Б. Смирнов установил, что первые трещины появляются не в самых напряженных точках, как этого требуют правила строительной механики, а колонны разрушаются без появления излома и изгибных трещин (как должно быть). Вместо этого в них появляются чисто сдвиговые трещины, что также является противоречием и говорит о нарушении равновесия. Кроме того, до сих пор еще никто не смог экспериментально воспроизвести сдвиговой характер сейсмического разрушения железобетонных конструкций даже при ускорениях грунта, равных 4000 g, а тип разрушения не похож ни на какие другие воздействия – ураганы, колебания сейсмоплатформ и т. д. И только подземные взрывы отдаленно напоминают сейсмические разрушения.

Отсюда С.Б. Смирнов делает вывод, что действующая на протяжении последнего столетия резонансно-колебательная сейсмическая концепция не отвечает реальному положению дел в сейсмостойком строительстве, как и основные на ней расчеты, нормы проектирования и меры сейсмозащиты. Истинной же причиной всех сейсмических разрушений являются не резонансные колебания гибких элементов конструкции, вызванные стоячими поперечными волнами, а мощными продольные мощные импульсы ускорения грунта, порождающие в здании ударные волны сдвига, которые вырезают из них отдельные участки вертикальными плоскостями, оставляя при этом совершенно нетронутыми соседние участки.

Во время землетрясения происходит подземный толчок, который сопровождается мощнейшим мгновенным выбросом энергии, вызывающим гигантские ускорения грунта. Продольная сейсмическая ударная волна, возникающая при этом в грунте, создает серию импульсов, которые «ударяют» по торцу фундамента, резко сдвигают его относительно здания и через стены или колонны заходят в него.

Зашедшая в здание ударная волна с огромной скоростью и почти беспрепятственно пробегает по нему сверху вниз, создавая участок сдвига в форме параллелограмма, где отсутствуют изгибные деформации и напряжения.

Сдвигая полосы, ударная волна заставляет принять эту же форму перемычки, зажатые между ними, образовывая в них наклонные трещины одного направления, вызывая тем самым разрушения. Затем, отразившись от свободного края стены, она меняет знак касательных напряжений и бежит вниз, повторяя описанные выше явления, но изменяя траекторию наклонных трещин на противоположную. В результате после полного пробега ударной волны в здании образуется густая сеть перекрестных наклонных трещин, вызывающих мелкое раздробление бетона в стенах или колоннах или раствора в швах кирпичной кладки. Этот вывод наглядно подтверждают результаты состояний каркасных зданий после землетрясений в Кобе (Япония), где характер и форма разрушения полностью совпали с предсказанными.

*Достоинства и недостатки  
ударно-волновой концепции С.Б. Смирнова*

Главное достоинство предлагаемой С.Б. Смирновым ударно-волновой концепции заключается в том, что она снимает ряд ключевых противоречий, заложенных в резонансно-колебательной концепции, и дает полное, четкое и всестороннее обоснование характера сейсмического разрушения.

Недостатком данной концепции является отсутствие четкого математического аппарата по определению величины сейсмического воздействия.

### Глава 3

## ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

В отличие от обычно применяемых мер, в основном связанных с повышением несущей способности конструкций, меры сейсмозащиты сооружений, связанные со значительным снижением уровня инерционных сил, развивающихся в них при землетрясениях, называют мерами активной сейсмозащиты. Начиная с 1925 года, когда было опубликовано предложение М. Вискордини по устройству в подвальной части зданий катковых опор или колонн со сферическими верхними и нижними опорами, в сейсмостойком строительстве был предложен и частично реализован целый ряд систем активной сейсмозащиты, большинство из которых может быть отнесено к следующим основным группам: системы, реализующие принципы сейсмоизоляции; адаптивные системы с изменяющимися характеристиками; системы с повышенным демпфированием; системы с гасителями колебаний.

Каждая из этих групп может быть разделена на несколько подгрупп, объединяющих системы сейсмозащиты по принципам конструктивной реализации или характеру динамического взаимодействия с защищаемой конструкцией сооружения. На рисунке 2 приведена схематичная классификация систем активной сейсмозащиты, учитывающая вышеназванные принципы разделения по группам. Данная классификация, включающая основные системы сейсмозащиты, не охватывает все возможные методы активной сейсмозащиты, и является в некоторой степени условной. Кроме того, возможно применение комбинированных систем сейсмозащиты, объединяющих две или более из вышеуказанных систем, что позволяет более полно использовать положительные свойства каждой отдельной системы и уменьшить влияние их отрицательных свойств.



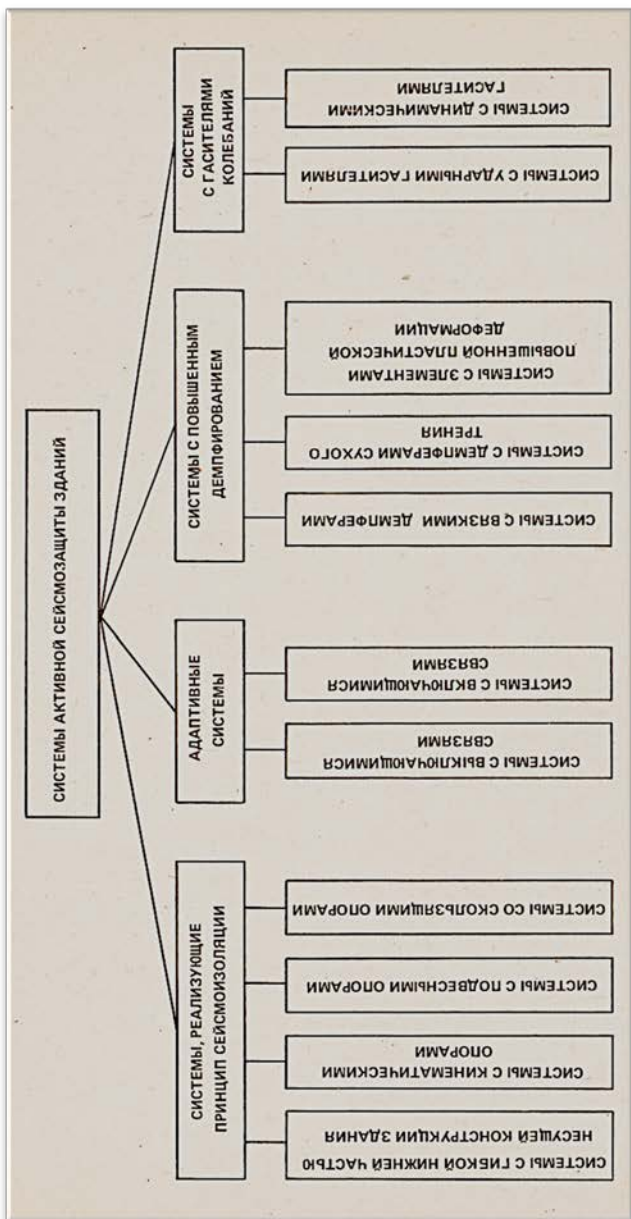


Рисунок 2 – Классификация систем активной сейсмозащиты зданий

Большинство из описанных ниже методов сейсмозащиты позволяет снизить сейсмическую реакцию сооружений в два-три раза, что дает возможность вести проектирование с расчетной сейсмичностью на балл ниже. Как правило, каждая система сейсмозащиты имеет определенную область применения, зависящую от основной конструкции здания, его этажности и характеристик возможных землетрясений.

Решая вопрос о применении сейсмозащиты, необходимо учитывать, что достаточно серьезные работы по исследованию активных систем сейсмозащиты начаты сравнительно недавно. Полученные в результате проведенных исследований данные еще не достаточны, чтобы делать окончательные выводы об их эффективности и надежности.

### **3.1. Сейсмоизоляция сооружений**

Самым старым и одним из наиболее перспективных методов активной сейсмозащиты является сейсмоизоляция. Сейсмоизоляцией называется существенное снижение сейсмического воздействия на часть сооружения, расположенную выше фундамента, путем установки каких-либо систем или элементов между этой частью сооружения и фундаментом.

Еще в древности в некоторых случаях строители с целью ослабить действие землетрясений на сооружения пытались изолировать здания от их основания путем устройства мягких прокладок на уровне верха фундаментов. Так, в III–VII веках некоторые монументальные сооружения Средней Азии строились на песчаных подушках, в X–XVII веках – на подушках из чистой глины, в цокольной части стен прокладывались мягкие камышовые прослойки. Однако, будучи спрессованными тяжелой кладкой стен и старея со временем, эти слои вряд ли надежно служили своей цели.

В начале нашего века, после землетрясений в Сан-Франциско и Токио, опять проявился интерес к специальным конструкциям подземной части зданий, способным уменьшить инерционные силы в их надземных частях. Примером этого могут служить упоминавшиеся выше предложения М. Вискордини.

Упоминание о возможности применения таких конструкций появилось и в нашей литературе после Крымских землетрясений 1927 года, где, однако, подчеркивалась практическая трудность их выполнения.

**Системы с гибкой нижней частью несущей конструкции здания.** В 1930-х годах возникла идея сейсмоизоляции зданий с помощью устройства в зданиях первого (или подвального) гибкого этажа. Эта идея основывалась на существовавшем в то время представлении, что при всех землетрясениях сейсмическая реакция зданий с гибкой конструктивной схемой всегда меньше, чем у зданий с жесткой конструктивной схемой. Эта идея получила довольно широкое распространение, в том числе и в нашей стране, так как для своего воплощения не требовала специальных мероприятий, выходящих за границы традиционных способов строительства зданий.

Начало строительства зданий с гибким первым этажом положено в 1930-х годах на Тихоокеанском побережье США, позже их стали возводить в Италии, Мексике, Югославии, СССР. При внедрении этой конструкции в практику сейсмостойкого строительства не все ее особенности и не все возможные типы землетрясений были учтены. Однако последствия ряда последующих землетрясений, а также анализ записей сильных землетрясений указали на возможность возникновения при некоторых землетрясениях весьма заметных ускорений в области периодов до 1–2 с, а иногда даже и до 4–5 с. В случае расположения зданий с первым гибким этажом в зоне таких землетрясений возможны их катастрофические разрушения, что и произошло в Каракасе в 1967 году. Большие повреждения и разрушения получили каркасные здания без заполнения в первом этаже в Агадире 1960 году, Скопле – в 1963-м и в Бухаресте 1977 году. Учитывая, что землетрясения с преобладанием низкочастотных колебаний достаточно редки, здания с гибким первым этажом могут использоваться как средство сейсмоизоляции, но только в сочетании с дополнительными сейсмозащитными средствами. В частности, могут быть применены динамические гасители колебаний, включающиеся или выключающиеся связи, включающиеся демпферы и т. п.

Расчет зданий с гибким первым этажом необходимо выполнять с учетом волнового характера сейсмического воздействия, так как возможны ситуации, когда суммарные сейсмические усилия в некоторых частях здания с гибким первым этажом могут за счет интенсивных вращательных движений даже возрасти по сравнению с обычным зданием.

Одним из направлений сейсмоизоляции, получившим довольно широкое распространение в Англии, Франции, США и Новой Зеландии, является использование резинометаллических опор, устанавливаемых между несущими конструкциями здания и фундамента. Первоначально такие опоры нашли широкое применение при конструировании сейсмостойких опор мостов, а затем с некоторой доработкой стали применяться и для сейсмоизоляции зданий (рисунок 3).

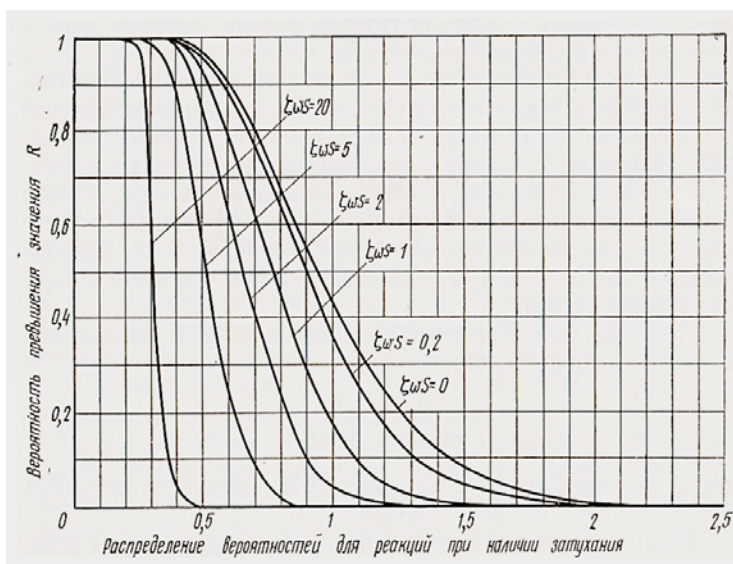


Рисунок 3 – Сейсмоизоляция здания с помощью резинометаллических опор:

- а – схема установки опоры; б – схема конструкции опоры GAPEC;
  - в – схема конструкции опоры, разработанной в Новой Зеландии.
- 1 – опора; 2 – стальная плата; 3 – слой неопрена; 4 – отверстия для анкерных болтов; 5 – резина; 6 – сталь; 7 – свинец

Так, опоры системы GAPEC (Франция) имеют слоистую конструкцию и состоят из попеременно чередующихся стальных листов и неопрена. Для предотвращения чрезмерной осадки зданий под нагрузкой от собственного веса опоры выполняют жесткими в вертикальной плоскости. В то же время они обладают малой жесткостью в горизонтальной плоскости (в 100 раз меньше ее жесткости в вертикальной плоскости), чтобы обеспечить возможность упругого бокового перемещения. Опоры обладают высокой прочностью при сжатии, растяжении и кручении благодаря упругим свойствам неопрена. В результате ряда принятых мер срок службы опоры, по данным авторов этой конструкции, достигает приблизительно 50 лет.

Данный тип сейсмоизолирующих опор был использован при строительстве школьного трехэтажного крупнопанельного здания размером в плане  $77,5 \times 30,5$  м в г. Ламбеск (Франция). Система сейсмозащиты предусматривала устройство 152 сейсмоизоляторов.

Похожие опоры разработаны специалистами Новой Зеландии. Конструктивная схема резинометаллической опоры показана на рисунке 3, в. Опора состоит из слоев резины, разделенных тонкими металлическими пластинами. Данные опоры использованы для сейсмоизоляции четырехэтажного здания в Новой Зеландии.

В Японии в г. Ятиё фирмой «Юнитика» осуществлено строительство и испытано на вибрационные нагрузки экспериментальное здание с сейсмоизолирующими слоистыми резинометаллическими опорами. Наземные конструкции здания опираются на шесть опор и на два дополнительных амортизирующих устройства с упорами. 2 июля 1983 года здание подверглось воздействию землетрясения, при котором амплитуда колебаний грунта достигала 20 см. Внутри здания не было обнаружено никаких повреждений, предметы и инженерное оборудование не перемещались, при этом зарегистрированы значительные деформации сейсмоизолирующих опор. По мнению специалистов Японии, данные опоры снижают сейсмические ускорения в три-пять раз.

Применение резинометаллических опор предполагает значительные боковые перемещения под действием сейсмической нагрузки, что вызывает необходимость специального обеспечения коммуникаций между подземной и надземной частями здания. Другой проблемой, возникающей при использовании указанных опор,

является обеспечение стабилизации здания под действием ветровых нагрузок. Это достигается путем использования специальных устройств, своего рода выключающихся связей, устанавливаемых в плоскости опор. При сейсмических воздействиях эти связи разрушаются и в дальнейшем должны восстанавливаться.

Учитывая хорошие сейсмоизолирующие свойства резинометаллических опор, а также имеющийся положительный опыт эксплуатации данных опор на ряде объектов в разных странах, можно предположить, что при некотором совершенствовании их конструкции они найдут достаточно широкое применение в системах сейсмоизоляции зданий. В настоящее время к существенным недостаткам этих систем следует отнести довольно высокую сложность (с точки зрения технологии строительства) изготовления таких опор, большое количество опор, необходимое под одно здание, а также повышенную чувствительность системы к низкочастотным воздействиям. Последнее требует применять такую систему сейсмоизоляции в сочетании с другими средствами сейсмозащиты, как и в случае применения зданий с первым гибким этажом.

**Системы с кинематическими опорами.** Как уже было сказано ранее, в 1925 году были опубликованы предложения М. Вискордини по устройству в подземной части зданий катковых опор или колонн со сферическими верхними и нижними опорами. С тех пор предложений об использовании опор качения как средства сейсмоизоляции зданий появилось очень много, но их применение в практике сейсмостойкого строительства встречается довольно редко.

Одной из основных причин этого является недостаточная изученность поведения такого рода систем при сейсмических воздействиях, особенно при землетрясениях, имеющих доминантные периоды более 1 с. При таких землетрясениях здание с кинематическими опорами может получить значительные смещения, при которых может произойти потеря устойчивости всего здания и его полное обрушение. Таким образом, такая система сейсмоизоляции может применяться только в районах, для которых прогнозируются высокочастотные землетрясения, и исключается возможность появления низкочастотных землетрясений. В остальных случаях сейсмоизоляция с кинематическими опорами может применяться только с дополнительными средствами сейсмозащиты.

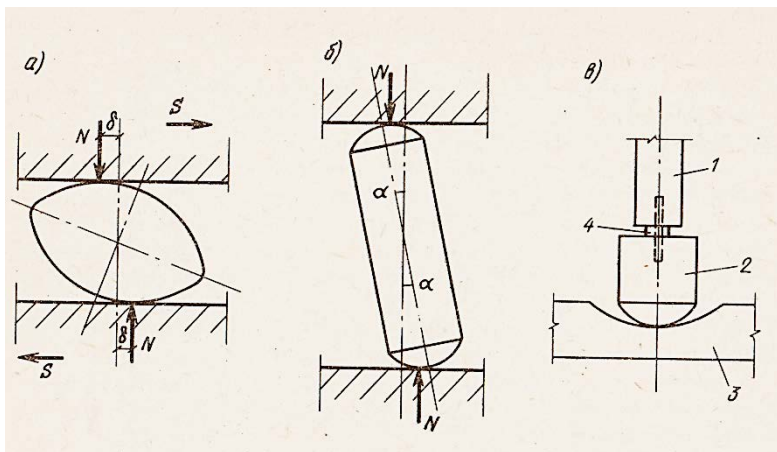


Рисунок 4 – Кинематические опоры, используемые для сейсмоизоляции зданий:

а – эллипсоиды вращения; б – стойка со сферическими поверхностями торцов; в – опора конструкции Ю.Д. Черепинского:

1 – колонна; 2 – подколонник; 3 – опорная плита;  
4 – центрирующая шайба

В настоящее время имеется некоторый опыт практического применения таких систем в нашей стране. Так, в Севастополе в 1972 году построено пятиэтажное крупнопанельное здание с сейсмоизолирующим поясом, состоящим из 6500 армоцементных опор в форме эллипсоидов вращения диаметром 6 см и высотой 5,8 см (рисунок 4, а), уложенных по всей площади фундамента. Кроме того, в здании применена демпфирующая система в виде железобетонного бункера, жестко соединенного с надфундаментной частью здания и свободно опущенного в слой песка.

С целью получения данных о реальных динамических параметрах здания были проведены экспериментальные исследования. Было обнаружено, что часть опор под действием веса здания разрушилась, что говорит об их неравномерном нагружении или разной прочности. Кроме того, при испытаниях выяснилось, что данное конструктивное решение не привело к существенному изменению динамических характеристик здания по сравнению с аналогичными

характеристиками зданий, имеющих обычные фундаменты. Проведенные дополнительные модельные исследования показали, что применение опор в форме эллипсоидов диаметром меньше 0,5 м не обеспечивает сейсмоизоляцию сооружений.

Полученные негативные результаты были учтены при проектировании двух восьмиэтажных зданий в Севастополе. В первом из них в качестве опор-эллипсоидов применены 270 железобетонных стоек высотой 41 см со сферическими поверхностями торцов. Нагрузка на стойки от здания передается через сплошную монолитную плиту. В здании применена система демпфирования с сухим трением.

Во втором здании применены железобетонные стойки высотой на этаж со сферическими поверхностями торцов. Так же, как и для первого здания, применены демпферы сухого трения.

Проведенные испытания показали, что периоды собственных колебаний зданий близки к расчетным и составляли 2,8 с – для первого и 3,6 с – для второго зданий.

К недостаткам данной системы следует отнести следующее. Изготовление стоек со сферическими торцами и специальными высокопрочными контактными поверхностями требует высокой точности, присущей скорее машиностроительному производству, чем строительной технологии. Кроме того, при наклонах стоек возникают существенные местные напряжения, для восприятия которых требуется дополнительная арматура, что приводит к увеличению расхода стали. Все это, а также повышенная точность при монтаже приводит к существенному возрастанию трудоемкости и стоимости конструкций. Более экономичной и простой при монтаже представляется система сейсмоизоляции с кинематическими опорами конструкции Ю.Д. Черепинского, примененная для четырехэтажного здания в г. Навои. Нижние основания кинематических опор, имеющие выпуклую сферическую поверхность опирания размещаются в сферических выемках опорной плиты фундамента, а верхние основания их соединяются шарнирно с колоннами посредством центрирующей шайбы.

Проведенные испытания показали, что жесткость кинематических фундаментов существенно нелинейна и колеблется от 3000 до 1000 т с/м. Данное обстоятельство может положительно



сказываться на адаптационных свойствах данной системы сейсмоизоляции при землетрясениях.

**Системы с подвесными опорами.** Идея гибкой подвески здания для снижения его сейсмической реакции была реализована в ряде проектов. В 1960-х годах в Ашхабаде было построено трехэтажное здание с сейсмоизоляцией системы Ф.Д. Зеленкова, где наземные конструкции с помощью тяжей и пружин подвешивались к стенам монолитного фундамента. В отличие от других предложений такая система должна была снижать как горизонтальные, так и вертикальные колебания. Однако опыты Туркменского института сейсмостойкого строительства не подтвердили предполагаемые большие значения периодов собственных колебаний здания, указав на сравнительно большую жесткость конструкции.

Похожая конструкция была применена в Испании. Фундамент этой конструкции (рисунок 5) представляет собой бетонный колодец, к верхней плите которого подвешена на четырех наклонных преднапряженных тросах железобетонная плита.

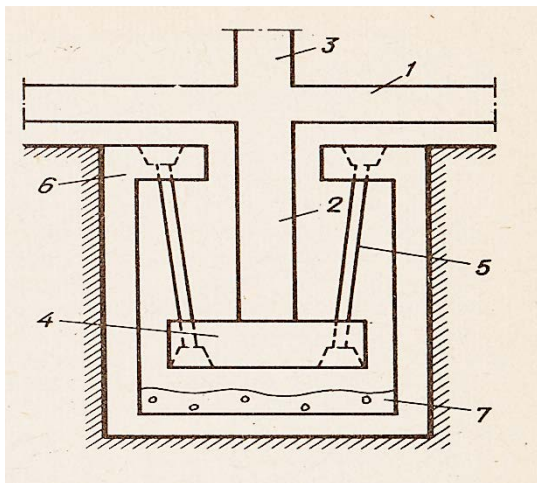


Рисунок 5 – Сейсмоизолирующий фундамент с подвесными опорами:  
1 – ростверк; 2 – опора под колонну; 3 – колонна;  
4 – плита под опорой; 5 – преднапряженный железобетонный трос;  
6 – верхняя плита колодца; 7 – слой песка

На эту плиту установлены железобетонные опоры, расположенные под колоннами здания и поверху объединенные железобетонным ростверком. Обе эти конструкции являются очень сложными и дорогими. Так, стоимость сейсмоизоляции системы Ф.Д. Зеленкова составила 24 % общих затрат. Кроме того, стальные пружины находятся постоянно под напряжением, здание чувствительно к любым динамическим нагрузкам. Поэтому представляется нерациональным рекомендовать сейсмоизоляцию такого типа для внедрения в сейсмостойкое строительство.

К этой же группе систем сейсмоизоляции можно отнести и здания с подвешенными этажами, получившие распространение в практике сейсмостойкого строительства за рубежом. К преимуществам таких зданий относятся: увеличение доли полезной площади помещений, меньшая чувствительность к неравномерным осадкам фундаментов, уменьшение объемов работ по возведению фундаментов. Недостатки таких систем остаются теми же, что и для указанных выше конструктивных решений систем с подвесными опорами. Одним из возможных направлений улучшения системы сейсмоизоляции с подвешенными этажами, повышения ее надежности является применение в перекрытиях узлов сухого трения.

**Системы со скользящими опорами.** Можно существенно снизить горизонтальные нагрузки, передаваемые на несущие надземные конструкции здания, если обеспечить возможность их проскальзывания относительно фундамента. Часть энергии, сообщаемая сооружению, затрачивается при этом не на преодоление сопротивления связей в конструкции, а на преодоление сил трения скольжения.

Скользкий пояс представляет собой ряд опор с пластинами из материалов с низким коэффициентом трения скольжения. Он устраивается между несущими конструкциями здания и фундаментом или непосредственно в фундаменте, разрезая его в горизонтальной плоскости. В качестве антифрикционных прокладок выбраны пластины из фторопласта и нержавеющей стали. При слабых колебаниях ускорения основания передаются на здание как при жесткой связи с фундаментом. При увеличении ускорения основания силы трения преодолеваются, и здание начинает проскаль-

зывать относительно фундамента, что приводит к ограничению инерционных сил, возникающих в вышележащих этажах. Для ограничения взаимных горизонтальных перемещений здания и фундамента в систему сейсмоизоляции вводят упругие (резинометаллические) и жесткие (железобетонные) ограничители. Для предотвращения отрыва здания от фундамента предусматриваются упругие ограничители вертикальных перемещений.

В г. Бишкеке построено несколько зданий со скользящим поясом, проведены их натурные испытания, которые подтвердили работоспособность сейсмозащиты в виде сейсмоизолирующего скользящего пояса в фундаменте. В целом при применении данной системы сейсмоизоляции для строительных площадок сейсмичностью 8 и 9 баллов обеспечивается снижение объемов антисейсмических мероприятий, расхода металла на 3–5 %, сметной стоимости строительства на 3–6 %.

Похожая система сейсмоизоляции была применена при строительстве атомной электростанции «Коеберг». Фундамент под сооружение выполнен в виде сдвоенной железобетонной монолитной плиты размером в плане  $150 \times 90$  м (рисунок 6, а). Нижняя фундаментная плита имеет 600 столбчатых опор размером  $2 \times 2 \times 2$  м. На каждую столбчатую опору уложено по четыре упругие подушки из неопрена размером  $70 \times 70 \times 10$  см. Эти подушки являются горизонтальным амортизатором. Над подушками расположена другая часть опоры, включающая две фрикционные пластины, способные перемещаться одна относительно другой с коэффициентом трения 0,2. Верхняя из пластин, выполненная из нержавеющей стали, связана с вышележащей конструкцией, нижняя, выполненная из бронзы с добавлением свинца, связана с упругой подушкой.

При слабом сейсмическом воздействии (ускорение порядка 0,15–0,2 g) происходит простое скручивание упругой подушки без смещения фрикционных пластин (рисунок 6, б). При возрастании ускорения (более 0,2 g) скручивание подушки сопровождается взаимным смещением пластин.

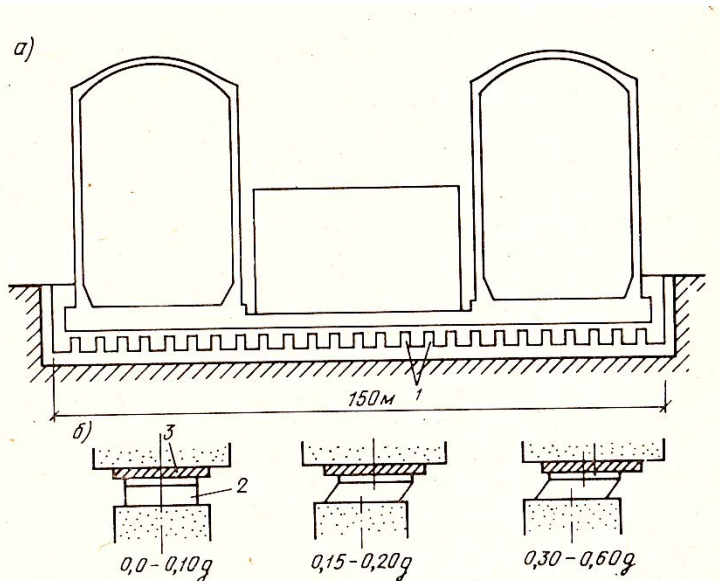


Рисунок 6 – Сейсмоизоляция атомной электростанции «Коеберг»:  
 а – конструктивная схема; б – схема работы фрикционной опоры  
 при различных нагрузках; 1 – фрикционные фундаментные опоры;  
 2 – упругая подушка из армированного неопрена;  
 3 – фрикционные пластины

Опыт проектирования и строительства описанных выше объектов показал, что данная система сейсмоизоляции может быть успешно применена для сооружений с жесткой конструктивной схемой. К достоинству данной системы можно отнести то, что она не требует создания дополнительных сложных, высокоточных узлов (сейсмоизолирующий пояс может быть легко выполнен как в заводских условиях, так и в условиях строительной площадки). При воздействиях ниже расчетных сооружения работают как обычные, с жесткой кинематической связью между фундаментом и вышележащими конструкциями. Система сейсмоизоляции обеспечивает наибольшее снижение сейсмических нагрузок при воздействиях, близких к максимальным расчетным.

### 3.2. Адаптивные системы сейсмозащиты

Из всех систем сейсмозащиты, по-видимому, наиболее полно разработана теория адаптивных систем, получившая основное развитие в ЦНИИСКе им. Кучеренко, начиная с 1960-х годов. К преимуществам адаптивных систем относится то, что они могут в процессе землетрясения менять свои динамические характеристики в регулируемых пределах, что позволяет системе «уходить» от резонансных явлений в случае совпадения доминантного периода колебаний землетрясения с основным периодом собственных колебаний сооружения.

**Системы с выключающимися связями.** Такие системы относятся к классу нестационарных динамических систем, то есть таких систем, которые в процессе колебаний под действием динамических нагрузок могут менять свои характеристики во времени, причем эти изменения являются необратимыми. Изменения динамических характеристик системы происходят за счет разрушения выключающихся связей при достижении некоторого порогового уровня амплитуд колебания системы. В качестве выключающихся связей применяются как специальные резервные элементы, так и отдельные несущие конструкции (рисунок 7). Адаптационные свойства системы сейсмозащиты с выключающимися связями проанализированы в работе.

Система с выключающимися связями применима в основном для зданий с жесткой конструктивной схемой, имеющих первый гибкий этаж. Это связано с тем, что необходимым условием эффективной работы этой системы является значительное снижение жесткости несущих конструкций здания в конце землетрясения в сравнении с начальной жесткостью системы до землетрясения. Учитывая, что трудно практически реализовать конструкцию здания с периодом собственных колебаний более 2–3 с, можно сказать, что системы с выключающимися связями применимы для зданий с периодом собственных колебаний не более 0,5–0,7 с.

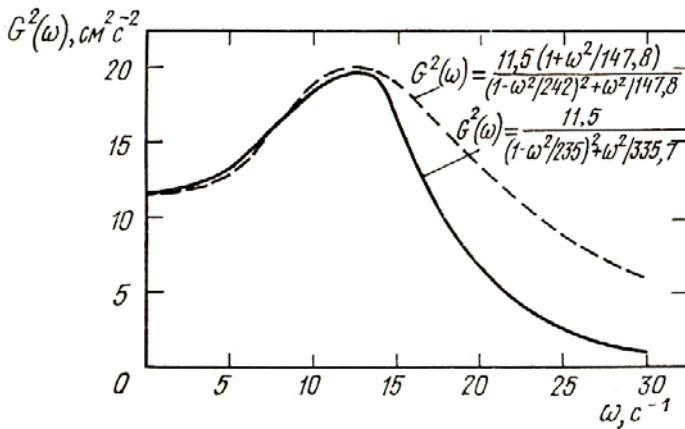


Рисунок 7 – Сейсмозащита здания с помощью выключающихся связей, представляющих собой: а – специальные выключающиеся элементы; б – разрушающиеся панели-связи

Сейсмозащита зданий с выключающимися связями наиболее эффективна и может применяться в районах, где наиболее вероятны землетрясения с преобладанием высокочастотных составляющих. Она нашла уже сравнительно широкое практическое применение, в частности на трассе БАМ, где город Северобайкальск в значительной степени застраивается зданиями по типовому проекту 122-й серии с выключающимися связями. Однако данной системе присущи и некоторые недостатки. Так, после разрушения выключающихся связей во время землетрясения необходимо немедленное их восстановление, что не всегда практически осуществимо. Кроме того, известно, что в некоторых случаях в процессе землетрясения в его заключительной стадии происходит снижение доминантной частоты и в связи с этим имеется возможность вторичного совпадения собственной частоты здания (с уже разрушенными в начальной стадии землетрясения выключающимися связями) с доминантной частотой землетрясения, что может привести к потере несущей способности конструкций здания. Избежать последнего можно в случае применения системы с выключающимися связями и упорами – ограничителями горизонтальных перемещений.

**Системы с включающимися связями.** Эти системы относятся к классу нелинейных динамических систем с жесткой характеристикой. В отличие от систем с выключающимися связями, в системах с включающимися связями не происходит разрушения связей, и нет необходимости их восстанавливать после землетрясения.

Здание с включающимися связями проектируется таким образом, чтобы оно имело низкую частоту собственных колебаний. При землетрясении в случае возникновения значительных перемещений основных несущих конструкций здания происходит включение связей, что приводит к существенному изменению жесткости системы и к увеличению «мгновенной» частоты собственных колебаний здания, в результате чего здание «уходит» от опасного для него резонансного режима колебаний. Выполнить условие низкой частоты собственных колебаний системы можно практически для здания любой этажности. Для многоэтажного каркасного здания это условие выполняется автоматически, для здания малой этажности с жесткой конструктивной схемой следует применять гибкий первый этаж.

На рисунке 8 приведены некоторые возможные конструктивные решения зданий с включающимися связями. В качестве включающихся связей могут быть использованы жесткие упоры – ограничители, упругие связи, жесткие панели и провисающие растяжки. Для исключения возможности возникновения удара при включении связей необходимо процесс изменения жесткости системы от начальной до конечной несколько растянуть, что может быть достигнуто за счет увеличения числа ступеней включения связей, вначале с меньшей, а затем с большей жесткостью.

Осуществлять сейсмозащиту зданий с помощью включающихся связей целесообразно в районах, где возможно возникновение землетрясений как высокочастотных, так и низкочастотных. Достоинство системы с включающимися связями заключается в том, что она работает с полной нагрузкой лишь при землетрясениях, имеющих значительные ускорения на низких частотах, а такие землетрясения бывают довольно редко. При достаточно часто возникающих высокочастотных землетрясениях система с включающимися связями сохраняет все преимущества систем с сейсмоизоляцией. К недостатку системы с включающимися связями

следует отнести возможность возникновения значительных усилий в конструкциях включающихся связей.

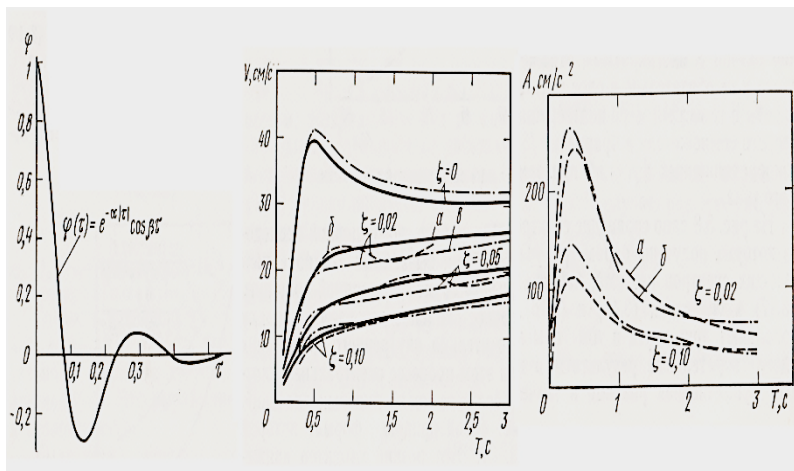


Рисунок 8 – Сейсмозащита здания с помощью включающихся связей, представляющих собой:  
 а – упоры-ограничители; б – упругие связи;  
 в – провисающие растяжки; г – жесткие панели  
 (для многоэтажных зданий)

Эффективность и надежность систем с включающимися и выключающимися связями можно существенно повысить в случае их совместного применения. Такой же результат можно получить и в случае одновременного применения системы с включающимися связями и динамического гасителя колебаний, позволяющего существенно снизить инерционную нагрузку на конструкции включающихся связей.

### 3.3. Системы с повышенным демпфированием

К мерам активной сейсмозащиты зданий можно отнести создание систем с повышенным демпфированием в несущих конструкциях. Известно, чем больше затухание в основной



конструкции, тем меньше реакция системы при одном и том же воздействии. Поэтому совершенно естественным является желание некоторых проектировщиков создать конструкции с повышенным рассеянием энергии при их колебаниях.

**Системы с вязкими демпферами.** Наиболее простым и эффективным способом уменьшения амплитуд колебания здания при землетрясении могло бы быть использование вязких демпферов промышленного изготовления. Демпфер состоит из цилиндрического корпуса, в который с определенным зазором помещен поршень. Демпфирующая жидкость состоит из двух компонентов, один из которых имеет большую вязкость, но малый удельный вес (например, полиметилсилоксановая жидкость), другой – малую вязкость, но больший удельный вес (вода). Рассеивание энергии происходит как при движении поршня в вертикальном направлении, так и при движении в горизонтальном. Но такие демпферы довольно дороги, и в них используется дефицитная вязкая жидкость. Кроме того, они требуют периодической проверки в процессе эксплуатации. В связи с этим в практике сейсмостойкого строительства в нашей стране они не нашли практического применения.

За рубежом вязкие демпферы нашли применение в системе сейсмоизоляции, применяемой фирмой GERB (ФРГ) для реакторов атомных электростанций.

**Системы с элементами повышенной пластической деформации.** В настоящее время активно развивается направление сейсмозащиты, связанное с использованием специальных устройств, так называемых энергопоглотителей, способных поглощать энергию сейсмических воздействий за счет развития в материале конструкций неупругих деформаций. Такие поглотители проектируются в узлах конструкций с наиболее вероятным возникновением зон пластических деформаций. Достоинством таких поглотителей является то, что они имеют небольшие размеры, возможность использования в зданиях различных конструктивных схем и возможность легкой замены в случае необходимости.

Основным элементом поглотителей могут служить стальные балки (рисунок 9), которые при пластических деформациях

способны поглощать значительное количество энергии. Испытание таких поглотителей показало, что продолжительность их эффективной работы достигает от 70 до нескольких сотен циклов. Это ограничивает срок их службы одним, двумя землетрясениями.

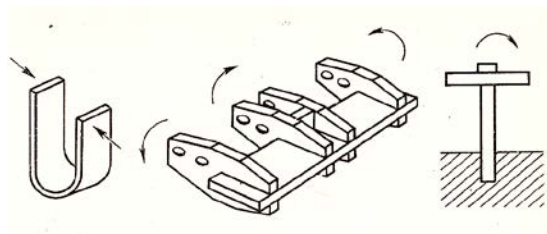


Рисунок 9 – Поглотители колебаний балочного типа

Исследования по изучению работы на знакопеременные циклические нагрузки различных конструктивных решений энергопоглотителей стержневого и рамного типов показали, что наибольшей энергоемкостью и долговечностью (55 циклов нагружения) обладает энергопоглотитель кольцевого типа, устанавливаемый в систему крестовых связей каркаса здания (рисунок 10).

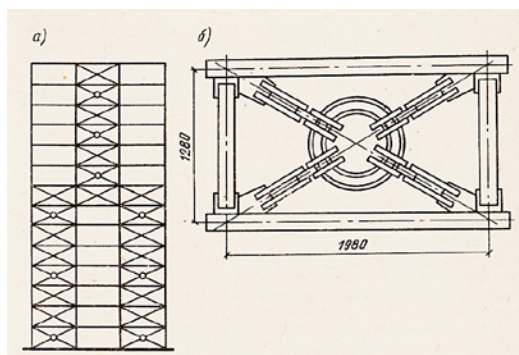


Рисунок 10 – Сейсмозащита каркасного здания с помощью энергопоглотителя кольцевого типа:  
 а – конструктивная схема каркасного здания; б – панель связевого каркаса с энергопоглотителем в виде сварного кольца двутаврового сечения

Поглотители энергии с существенно большим сроком службы разработаны специалистами Новой Зеландии. Ими предложена конструкция экструзионного поглотителя энергии, ведущего себя как «Кулонов демпфер». Конструкции экструзионных поглотителей энергии двух типов показаны на рисунке 11. Поглотитель I типа состоит из цилиндра с толстыми стенками и двух поршней, соединенных стержнем. Посредине цилиндра предусмотрено местное сужение сечения. Пространство между поршнями и стенками цилиндра заполнено свинцом. При колебаниях конструкции, к которой присоединен поглотитель, происходит протягивание свинца через экструзионное отверстие, образованное стенками цилиндра в его суженном сечении и стержнем. Так как протягивание связано с процессом пластических деформаций, то по мере продвижения поршня в цилиндре происходит рассеивание энергии.

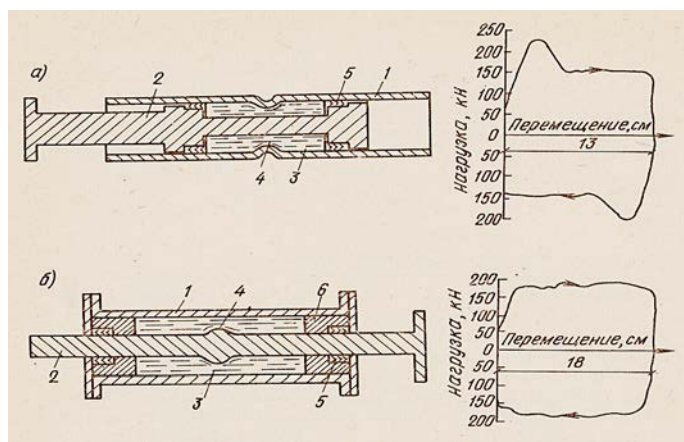


Рисунок 11 – Экструзионные поглотители колебаний I (а) и II (б) типов и их диаграммы «нагрузка – перемещение»:  
 1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – свинец; 4 – экструзионное отверстие;  
 5 – уплотнение; 6 – вкладыш

Поглотитель энергии с ходом поршня  $\pm 20$  см, рассчитанный на восприятие динамической силы 150 кН, имеет массу 100 кг. Были проведены испытания поглотителя на частотах 0,5; 1,0

и 2,0 Гц в течение 3400 циклов. После этого испытания свойства поглотителя не изменились, и на основании этого было сделано заключение, что поглотитель выдержит ряд землетрясений.

Поглотитель энергии II типа отличается от поглотителя I типа тем, что состоит из цилиндра с ровными стенками, а движущийся стержень имеет утолщение в средней части. Поглотитель II типа имеет более высокий КПД. Экструзионные поглотители энергии получили практическое применение при строительстве моста с наклонным пролетным строением над автострадой в г. Веллингтоне. Для поглощения энергии колебаний установлено шесть поглотителей, которые одним концом прикреплены к опоре моста, а другим – к пролетному строению. Предполагается также применять такие поглотители энергии в раскосных элементах каркаса зданий.

**Системы с демпферами сухого трения.** Наряду с предложениями об использовании в сейсмостойком строительстве упругопластических систем существуют предложения об использовании упругофрикционных систем. Существо этих предложений заключается в том, что в конструкциях зданий организовываются зоны, в которых при деформациях определенной величины происходит взаимное проскальзывание элементов конструкций при сухом трении.

Разработана конструкция объемно-блочного здания в виде вертикальных упругих ветвей состоит из ряда блоков, установленных друг на друга и жестко соединенных между собой в горизонтальных стыках. Ветви соединяются между собой на болтах, равномерно расположенных по высоте здания. Усилия в болтах задаются по расчету, исходя из условия наибольшего поглощения энергии в системе в результате проскальзывания в вертикальных швах. К достоинству данной системы можно отнести то, что можно регулировать величину обжатия соприкасающихся поверхностей элементов системы, добываясь оптимальной с точки зрения снижения сейсмической реакции здания.

В ТбилЗНИИЭП разработана система сейсмозащиты для 16-этажного каркасно-панельного здания, предусматривающая использование фрикционных диафрагм. Особенность конструкции заключается в том, что стены-диафрагмы выполнены из двух

панелей, одна из которых крепится к ригелю верхнего этажа, а другая – к ригелю нижнего этажа. Между панелями проложен фрикционный материал, и образованный трехслойный пакет обжимается болтами, число которых назначается по расчету (рисунок 12).

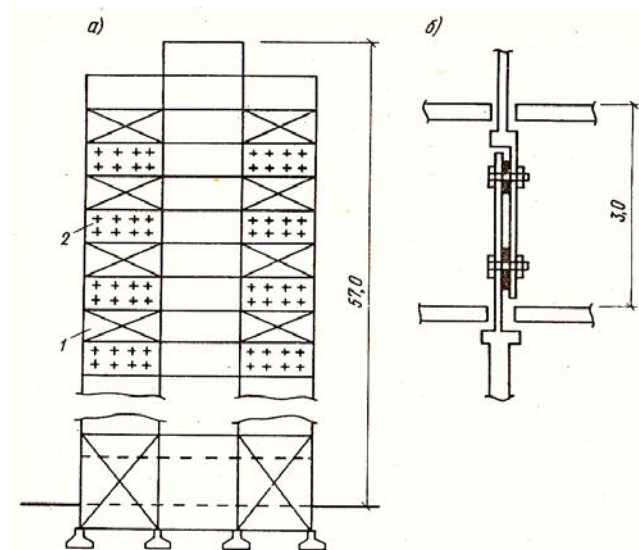


Рисунок 12 – Сейсмозащита здания с помощью фрикционных диафрагм:  
 а – конструктивная схема 16-этажного жилого здания в Тбилиси;  
 б – конструкция фрикционной диафрагмы; 1 – стационарная диафрагма;  
 2 – фрикционная диафрагма

В Минпромстрое Армянской ССР для многоэтажных каркасно-ствольных зданий, возводимых методом подъема этажей или перекрытий, разработаны V-образные стальные и «песочные» демпферы, располагаемые между каркасом и стволом здания. Эксперименты на моделях показали, что применение таких демпферов позволяет увеличить логарифмический декремент колебаний в три раза, а расчеты, проведенные для 12-этажного здания, показали, что демпферы позволяют уменьшить прогибы ствола в пять раз и прогибы каркаса в два раза при резонансных колебаниях всей системы.

В работах развивается идея применения несущих высокопрочных болтов для улучшения диссипативных характеристик конструкций. Так, при испытании модели решетчатой конструкции регулировка степени обжатия соединений только раскосов высокопрочными болтами позволила изменить величину декремента колебаний более чем вдвое.

Экспериментальные и теоретические исследования работы конструкций с учетом сил трения между элементами выполнены в Харьковском ПромстройНИИпроекте. Показано, что сухое трение существенно влияет на вибрацию строительных конструкций, получены значения коэффициентов трения бетона по бетону (0,6–0,725) и бетона по стали (0,45–0,6).

Кроме перечисленных выше конструктивных решений, предусматривающих размещение довольно большого числа элементов с сухим трением по всему объему здания, имеются решения, в которых демпферы сухого трения сосредоточены в нескольких местах, как правило, в уровне первого этажа здания. Демпферы сухого трения такого типа могут применяться в системах сейсмоизоляции в зданиях с первым «гибким» этажом, с высоким свайным ростверком и с кинематическими фундаментами.

Недостатком всех предлагаемых решений с использованием сухого трения является нестабильность демпфирующих характеристик, возможность их существенного изменения в процессе эксплуатации зданий.

### **3.4. Системы с гасителями колебаний**

Гасители колебаний относятся к специальным устройствам, применяемым для снижения уровня вибраций защищаемой конструкции. При работе гасителя энергия колебаний защищаемой конструкции передается гасителю, который благодаря этому колеблется с повышенной амплитудой. Наиболее широкое применение гасители нашли в машиностроении. В последние годы гасители колебаний активно начали применять в строительстве для снижения колебаний сооружений, подверженных динамическим воздействиям от технологического оборудования и ветра.

Гасители колебаний бывают активного и пассивного типа. В настоящее время интенсивно разрабатывается теория активного гасителя колебаний применительно к машиностроительным конструкциям, Применение активного гасителя позволяет добиться максимального эффекта в снижении колебаний, однако конструкция такого гасителя обладает определенной сложностью, дорога и ненадежна в эксплуатации. По этим причинам гасители активного типа не нашли применения в практике строительства. В будущем при разработке более простых и надежных конструкций активного гасителя, а также при возрастании культуры строительного производства такой тип гасителя, возможно, получит право на внедрение в практику строительства. В настоящее время более экономичным является применение в строительстве гасителей пассивного типа, обладающих свойствами автономности и относительной безотказности в работе.

По характеру взаимодействия, гасителя с защищаемой конструкцией различают ударные и динамические гасители колебаний.

**Ударные гасители колебаний.** Теория ударных гасителей (рисунок 13) разработана достаточно полно. Для виброзащиты сооружений ударные гасители колебаний нашли применение сравнительно давно. Простота устройства и надежность в эксплуатации делают эти гасители удобными для применения в башенных сооружениях.

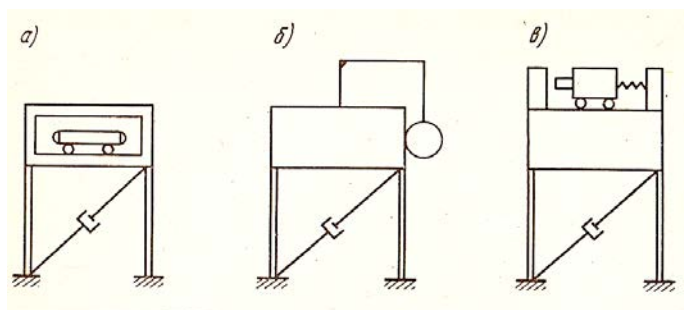


Рисунок 13 – Схемы ударных гасителей колебаний плавающего (а), маятникового (б) и пружинного (в) типов

**Динамические гасители колебаний.** Динамический гаситель в простейшем исполнении представляет собой массу на пружине, с помощью которой он крепится к объекту защиты. Динамический гаситель был изобретен Фрамом в 1909 году. Динамические гасители колебаний считаются одними из наиболее эффективных пассивных виброзащитных средств, способных подавлять установившиеся вынужденные колебания механизмов и конструкций при моногармоническом возмущении.

Теоретические основы расчета систем с динамическим гасителем были заложены в работах Дж.П. Ден-Гартога, С.П. Тимошенко и Дж.Э. Брока. В дальнейшем теория динамического гасителя колебаний получила развитие в работах большого числа как советских, так и зарубежных ученых. Это позволило широко применять динамические гасители колебаний в машиностроении, в судостроении и самолетостроении.

Теоретические и экспериментальные работы Б.Г. Коренева, Н.А. Пикулева, Л.М. Резникова, М.Я. Волоцкого и других авторов привели к созданию различных систем гасителей и практических методов их расчета, что обеспечило их широкое применение для промышленных и гражданских сооружений. Наиболее часто гасители применяются для защиты от колебаний, вызванных действием машин и ветра.

В качестве примера можно указать на опыт применения динамического гасителя, позволившего снизить амплитуды колебаний башни высотой 100 м при воздействии порывов ветра в три раза, а также на опыт гашения колебаний перекрытий ряда зданий в 2–5 раз в результате установки на них группы гасителей. Необходимо отметить, что динамические гасители наиболее эффективны при гашении колебаний, которые носят резонансный характер и возникают в конструкциях, обладающих малым затуханием.

За рубежом динамические гасители установлены, в частности, на телевизионной башне в Дрездене. Проведенные испытания показали, что установка гасителей позволила существенно (в 5–10 раз) повысить логарифмический декремент колебаний данных высоких гибких сооружений. В Австралии в качестве гасителя для высотного здания использован резервуар с водой, а в США в двух высотных зданиях установлены механические гасители колебаний,



разработанные фирмой MTS. Испытания здания с механическим гасителем колебаний показали, что при массе гасителя, составляющей 1 % массы здания, затухание всей системы может быть увеличено в два раза, а выполненные расчеты показали, что стоимость гасителя, несмотря на его сложность, составила одну треть от дополнительных расходов, которые были бы необходимы в случае строительства здания без гасителя.

Применение гасителей в одних случаях способствовало получению экономического эффекта за счет снижения расчетных нагрузок, в других позволило ограничить колебания таким уровнем, который не мешал бы осуществлению требуемого технологического процесса.

Использование динамических гасителей колебаний для снижения сейсмической реакции зданий в ряде случаев представляется достаточно эффективным. Динамический гаситель, применяемый для снижения сейсмической реакции здания, состоит из жесткого элемента или блока, упругих связей, присоединяющих массу гасителя к конструкциям здания и демпфирующих элементов, устанавливаемых параллельно с упругими связями. В случае совпадения основного периода собственных колебаний здания с одним из преобладающих периодов сейсмического воздействия, масса гасителя начинает совершать колебания с амплитудами, значительно превышающими амплитуды колебаний здания. Возникающие при этом упругие и диссипативные силы в элементах гасителя, воздействуя на здание, уменьшают амплитуды его колебаний.

В зависимости от конструктивного выполнения упругой связи динамические гасители подразделяются на три группы: пружинные гасители, маятниковые гасители и комбинированные гасители (рисунок 14).

Пружинный гаситель (рисунок 14, а) состоит из массивного блока, который опирается на перекрытие здания через скользящие опоры (пластины с достаточно низким коэффициентом трения) и стальных пружин, размещаемых между блоком и несущими конструкциями здания или специальными упорами. Требуемое затухание в гасителе обеспечивается за счет сил сухого трения в скользящих опорах, возникающих при относительных перемещениях

массы гасителя. В случае необходимости (по расчету) параллельно пружинам дополнительно устанавливаются вязкие демпферы.

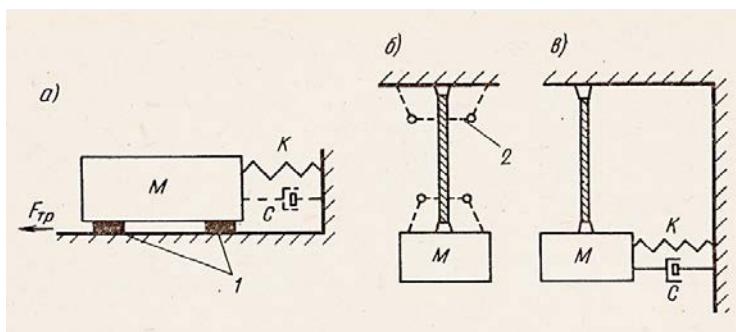


Рисунок 14 – Схемы динамических гасителей колебаний пружинного (а), маятникового (б) и комбинированного (в) типов:  
1 – скользящая опора; 2 – промежуточная опора

Маятниковый гаситель (рисунок 14, б) состоит из блока, подвешенного на жестких тросах, которые жестко заделаны в точках подвеса. Частота собственных колебаний маятникового гасителя регулируется изменением длины тросов, а затухание в гасителе обеспечивается за счет внутреннего трения, возникающего при изгибных деформациях верхней части тросов при колебаниях массы гасителя. В случае необходимости затухание в гасителе может быть увеличено за счет создания промежуточных опор в верхней и нижней частях троса.

Комбинированный гаситель (рисунок 14, в) состоит из блока, который крепится к несущим конструкциям здания с помощью гибких подвесок и стальных пружин. Частота собственных колебаний комбинированного гасителя регулируется за счет изменения жесткости стальных пружин. Требуемое затухание в гасителе обеспечивается установкой вязких демпферов.

Динамические гасители колебаний могут применяться как для снижения расчетных сейсмических нагрузок на несущие конструкции зданий, так и для повышения надежности особо ответственных зданий, при этом расчетные нагрузки на такие здания не снижаются. Для здания повышенной этажности с металлическим каркасом

в случае применения гасителя расчетная горизонтальная сейсмическая нагрузка на здание может быть снижена на балл, а для зданий с железобетонным каркасом соответственно на половину балла. Применение гасителей для высоких зданий в сейсмических районах оправдано еще и тем, что один и тот же гаситель снижает реакцию здания, как на сейсмическое воздействие, так и на ветровое.

Динамические гасители колебаний могут применяться как самостоятельная система сейсмозащиты, так и в сочетании с другими системами активной сейсмозащиты. В первом случае гасители колебаний рекомендуется применять преимущественно для зданий с расчетной сейсмичностью 7 баллов.

К недостаткам сейсмозащиты зданий с помощью динамических гасителей следует отнести относительную сложность конструкций гасителей колебаний и невозможность их применения для массового строительства из-за необходимости индивидуальной настройки гасителя для каждого конкретного здания.

### **3.5. Перспективы внедрения систем активной сейсмозащиты в сейсмостойкое строительство**

Представленный выше обзор показывает, что в нашей стране и за рубежом предложено и разработано большое количество систем активной сейсмозащиты зданий. Отдельные из этих систем получили практическое воплощение на отдельных объектах, это позволило оценить их технологичность для строительного производства. На многих объектах проведены вибрационные испытания, что позволило получить экспериментальные данные о поведении этих систем при динамических воздействиях. Однако, по существу, все разработанные системы нуждаются в дополнительных исследованиях преимущественно в натуральных условиях, так как многие стороны реального поведения систем сейсмозащиты трудно исследовать теоретически или на моделях из-за весьма большого количества факторов, влияющих на поведение сооружения при интенсивном землетрясении.

Широкое внедрение систем активной сейсмозащиты в настоящее время также сдерживается практически полным отсутствием данных о реальном поведении таких систем при сильных землетрясениях.

Тем не менее внедрение систем сейсмозащиты в экспериментальном строительстве следует продолжать и расширять по двум основным причинам. Во-первых, только в процессе строительства можно достоверно оценить технологичность каждой системы сейсмозащиты, получить данные о технико-экономических показателях, которые, в конечном счете, могут оказаться решающими при выборе той или иной системы сейсмозащиты.

Во-вторых, уже сейчас на основании существующего опыта теоретических и экспериментальных исследований можно выделить ряд перспективных для сейсмостойкого строительства систем сейсмозащиты.

Для 7- и 8-балльных районов для зданий с жесткой конструктивной схемой можно рекомендовать системы сейсмоизоляции с резинометаллическими опорами, с кинематическими фундаментами, разработанными в КазпромстройНИИпроекте, системы с гибким первым этажом с демпферами сухого трения. В зданиях, имеющих металлический каркас, рационально применять упругопластические поглотители, а для высоких зданий с металлическим каркасом – динамические гасители колебаний. Для многоэтажных каркасно-панельных зданий можно рекомендовать фрикционные диафрагмы.

В районах с 9-балльной расчетной сейсмичностью следует применять в основном здания с жесткой конструктивной схемой, имеющие сейсмоизолирующий скользящий пояс в фундаменте. Для зданий с каркасной конструктивной схемой следует применять выключаются и включающиеся связи.

Перспективным является совместное применение различных систем сейсмозащиты, так называемых комбинированных систем, что позволяет сочетать их достоинства и уменьшить влияние неблагоприятных свойств, присущих отдельно каждой из систем. Так, например, для здания, имеющего одну из систем сейсмоизоляции, дополненную включающимися связями и динамическим гасителем колебаний, можно снизить расчетную нагрузку на полтора-два балла при любом возможном спектральном составе землетрясения.

В заключение заметим, что в тех случаях, когда возможны землетрясения со значительными вертикальными ускорениями проектирование систем активной сейсмозащиты необходимо вести с учетом как горизонтальных, так и вертикальных колебаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железобетонные стены сейсмостойких зданий. Совместное издание СССР – Греция. – М.: Стройиздат, 1988. – 501 с.
2. Карпатское землетрясение 1986 г. – Кишинев: Штиинца, 1990. – 334 с.
3. *Ньюмарк Н.* Основы сейсмостойкого строительства / Н. Ньюмарк, Э. Розенблюэт. – М.: Стройиздат, 1980. – 344 с.
4. *Ордобаев Б.С.* Разрушения зданий – результат неизвестности сейсмического воздействия / Б.С. Ордобаев // Вестник МУК. – Бишкек, 2011. – № 1(20). – С. 120–122.
5. *Кутуев М.Д.* Теория и практика сейсмозащиты сооружений / М.Д. Кутуев, Б.Т. Укуев, Б.С. Матозимов, Э.М. Мамбетов. – Бишкек, 2010. – 372 с.
6. *Поляков С.В.* Последствия сильных землетрясений / С.В. Поляков. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 312.
7. *Клаф Р.* Динамика сооружений / Р. Клаф, Дж. Пензиен. – М.: Стройиздат, 1979. – С. 320.
8. *Рыков Г.В.* Прикладные методы динамики сооружений / Г.В. Рыков // Труды МИСИ им. Куйбышева. – М., 1992. – С. 103.
9. *Рыков Г.В.* Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках / Г.В. Рыков, А.М. Скобеев. – М.: Наука, 1978.
10. *Рудаев Я.И.* О механической прочности бетона при сжатии / Я.И. Рудаев, Б.М. Сеитов // Материалы XIX конф. по механике (30 мая – 2 июня 2001 г.) / Санкт-Петербургский дом ученых. Научный центр РАН. – СПб., 2001. – Т. 3. – С. 71.
11. *Саваренский Е.Ф.* Элементы сейсмологии и сейсмометрии / Е.Ф. Саваренский, Д.П. Кирнос. – М.: Гостехиздат, 1966. – С. 543.
12. *Сеитов Б.М.* Вероятностное моделирование надежности строительных конструкций / Б.М. Сеитов. – Бишкек, 2002. – 232 с.

13. *Сеитов Б.М.* Выбор состава тяжелого бетона с применением математических материалов / Б.М. Сеитов. – Ош: ОшТУ, 1997. – 32 с.
14. *Сеитов Б.М.* Практические методы расчета элементов железобетонных конструкций / Б.М. Сеитов. – Ош: ВТК, 1995. – 28 с.
15. *Смирнов С.Б.* Исследование аномальных форм в сейсмических разрушениях зданий, противоречащих официальной теории сейсмозащиты и опровергающих официальный взгляд на причины разрушения зданий при землетрясениях / С.Б. Смирнов // Объединенный научный журнал. – 2008. – № 9. – С. 51–59.
16. *Смирнов С.Б.* Критический анализ современной теории и практики сейсмозащиты зданий и принципы их совершенствования / С.Б. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. – 1995. – № 2.
17. *Смирнов С.Б.* Новые принципы сейсмозащиты зданий / С.Б. Смирнов // Бюллетень строительной техники (БСТ). – 1998. – № 8. – С. 2–3.
18. *Смирнов С.Б.* Обоснование причин разрушения «сейсмостойких» зданий и эффективные меры их сейсмозащиты / С.Б. Смирнов // Энергетическое строительство. – 1994. – № 4.
19. *Смирнов С.Б.* О причинах провала официальной стратегии сейсмозащиты / С.Б. Смирнов // Объединенный научный журнал. – М., 2008. – № 9. – С. 51–63.
20. *Смирнов С.Б.* О расчете защитных железобетонных оболочек АЭС на непробиваемость при ударе «мягкого протяженного объекта» / С.Б. Смирнов // Энергетическое строительство. – 1992. – № 11. – С. 57–59.
21. *Смирнов С.Б.* О принципиальной ошибке в традиционной трактовке записей инерционных сейсмических приборов / С.Б. Смирнов // Жилищное строительство. – 1995. – № 1. – С. 23–25.
22. *Смирнов С.Б.* Особенности работы и прочностного расчета зданий при импульсных сейсмических воздействиях / С.Б. Смирнов // Жилищное строительство. – 1995. – № 3. – С. 14–17.

23. *Смирнов С.Б.* Причины разрушения сейсмостойких зданий и принципы их эффективной сейсмозащиты / С.Б. Смирнов // Бетон и железобетон. – 1994. – № 3.
24. *Смирнов С.Б.* Поверхностная толща грунта, как усилитель разрушительного эффекта сейсмических волн и генератор сдвиговых колебаний / С.Б. Смирнов // Жилищное строительство. – 2009. – № 12.
25. *Смирнов С.Б.* Полное отсутствие информации о сейсмических воздействиях – главная причина разрушения зданий при землетрясениях / С.Б. Смирнов // Жилищное строительство. – 1994. – № 12. – С. 13–16.
26. *Смирнов С.Б.* Решение проблемы надежной сейсмозащиты зданий и сооружений / С.Б. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. – 1999. – № 10. – С. 43–45.
27. *Смирнов С.Б.* Разрушение «сейсмостойких» зданий в Кобе / С.Б. Смирнов // Жилищное строительство. – 1995. – № 8. – С. 17–19.
28. *Смирнов С.Б.* Сдвиговый механизм сейсмических колебаний грунта и качественно новые эксперименты для получения их реальных параметров, вызывающих волновой срез колонн и стен в зданиях / С.Б. Смирнов // Объединенный научный журнал. – М., 2009. – № 12. – С. 51–55.
29. *Смирнов С.Б.* Сейсмический срез зданий – результат отдачи толщи грунта, сдвигаемой глубинными сейсмическими волнами / С.Б. Смирнов // Жилищное строительство. – 2009. – № 9.
30. *Смирнов С.Б.* СНиП II-7-81\* «Строительство в сейсмических районах» как документ, опровергающий официальную колебательную доктрину сейсмического разрушения зданий / С.Б. Смирнов // Жилищное строительство. – 2010. – № 4.
31. *Смирнов С.Б.* СНиП II-7-81\* «Строительство в сейсмических районах» и новый вариант «СНиП-22-03-2009 как дополнительные источники сейсмоопасности и сейсмического риска для граждан Российской Федерации / С.Б. Смирнов // Жилищное строительство. – 2010. – № 9.

32. *Смирнов С.Б.* Прочностной расчет железобетонной оболочки АЭС при ударе самолета / С.Б. Смирнов, В.Н. Земскова // Бетон и железобетон. – 1992. – № 1.
33. *Смирнов С.Б.* Недостаток информации о параметрах воздействия при землетрясении / С.Б. Смирнов, Б.С. Ордобаев, А.К. Стамалиев, У.У. Матмуратов // Наука и новые технологии. – Бишкек, 2009. – № 8. – С. 26.
34. *Смирнов С.Б.* Сейсмические разрушения – альтернативный взгляд / С.Б. Смирнов, Б.С. Ордобаев, Б.Р. Айдаралиев // Сб. научных трудов. Часть I. – Бишкек: Айат, 2012. – 138 с.
35. *Смирнов С.Б.* Сейсмические разрушения – альтернативный взгляд / С.Б. Смирнов, Б.С. Ордобаев, Б.Р. Айдаралиев // Сб. научных трудов. Часть II. – Бишкек: Айат, 2013. – 144 с.
36. *Смирнов С.Б.* Сейсмический прочностной расчет одноэтажных зданий / С.Б. Смирнов, Б.С. Ордобаев, Д.Ш. Кожобаев, К.Т. Темикеев // Наука и новые технологии. – 2010. – № 2. – С. 48–51.
37. *Смирнов С.Б.* Анализ сейсмозащиты зданий и сооружений / С.Б. Смирнов, Б.С. Ордобаев, Ж.Ы. Маматов, Д.А. Рыспаев // Известия ВУЗов. – Бишкек, 2008. – № 10. – С. 12–14.
38. *Смирнов С.Б.* Почему рушатся «сейсмостойкие» здания при землетрясениях? / С.Б. Смирнов, Ж.Т. Тентиев, Б.С. Ордобаев [и др.] // Вестник МУК. – Бишкек, 2011. – № 1 (20). – С. 137–138.
39. *Смирнов С.Б.* Упругая отдача сдвигаемой толщи грунта как реальная причина сейсмического среза зданий / С.Б. Смирнов // Объединенный научный журнал. – М., 2008. – № 11. – С. 57–60.
40. *Смирнов С.Б.* Поверхностная толща грунта – генератор сдвиговых колебаний» / С.Б. Смирнов, Ж.Т. Тентиев, Б.С. Ордобаев, Д.Ш. Кожобаев // Известия ВУЗов. – Бишкек, 2008. – № 10. – С. 14–17.
41. *Смирнов С.Б.* Некоторые вопросы о причинах и формах разрушений при сейсмических воздействиях / С.Б. Смирнов, К.Т. Темикеев, Б.С. Ордобаев, К.М. Джаманкулов // Тр. междунар. конф. по распространению упругих и упругопластических волн, посвященной столетию со дня рождения академика, Героя социалистического труда Х.А. Рахматуллина, г. Бишкек, 28–29 мая 2009. – Бишкек, 2009. – С. 358–363.



42. *Смирнов С.Б.* Разрушение зданий глубинными сейсмическими волнами / С.Б. Смирнов, К.Т. Темикеев, Б.С. Ордобаев, У.У. Матмуратов // Наука и новые технологии. – 2010. – № 2. – С. 45–47.
43. *Смирнов С.Б.* Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружений / С.Б. Смирнов // Энергетическое строительство. – 1992. – № 9. – С. 70–72.
44. *Смирнов С.Б.* Уроки катастрофы в г. Кобе (Япония) / С.Б. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. – 1995. – № 7.
45. СНиП КР 20-02:2009 «Сейсмостойкое строительство», Госстрой КР. – Бишкек, 2009. – 103 с.
46. *Токтосопиев А.М.* Электромагнитные предвестники землетрясений / А.М. Токтосопиев. – Каракол, 2007. – 314 с.
47. *Хахо И.Х.* Динамическая коррекция сейсмических сигналов в задаче анализа качества и надежности электрооборудования / И.Х. Хахо // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 5. – С. 138–143.
48. *Штейнбругге К.* Инженерный анализ последствий землетрясений 1952 г. в Южной Калифорнии / К. Штейнбругге, Д. Морган. – М.: Госиздат, 1957. – С. 270.
49. A survey report for building damages due to the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake // Building Research Institute; Ministry of Construction (Japan). – 1996, March, p. 222.
50. Proceedings of the ninth European Conference on Earthquake Engineering. – Moscow, 1990. – 297 p.
51. Proceedings of the ninth European Conference on Earthquake Engineering. – Moscow, 1990. – 297 p.
52. *Sergey Smirnov.* Discordances between seismic destruction and present calculation // International Civil Defense Journal. – 1994. – № 1. – P. 6–7; 28–29; 46–47.
53. Seismic design guide – lines for structures. International Navigation Association. – 2001. – 284 p.
54. *Sergey Smirnov.* Seismic shears of buildings are the result of output of soil thickness, displaced by abyssal seismic waves // The integrated scientific Journal. – Moscow, Russia, 2009. – № 7. P. 64–68.

55. Soils and Foundations. Special issue of Geotechnical aspect of the January 17, 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Japanese Geotechnical Society, January 1996, p. 356.
56. *Sergey Smirnov*. The Main Suspect // Science in Russia. – 1994. – № 5.
57. *Smirnov S.B.* Discordances between real seismic destruction and present calculation // International Civil Defence Journal. – 1994. – № 4.
58. Soils and foundations, Special issue of Geotechnical Aspect of the January 17 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japanese Geotechnical Society, January 1996, 359 p.

*Бейшенбек Сыдыкбекович Ордобаев,  
Джуман Арпочиевич Рыспаев,  
Ширин Суюнбаевна Абдыкеева,  
Дильжан Нурбековна Мусуралиева  
Таалайбек Сагындыкович Мамбеталиев*

## СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА И ЕЕ ОРГАНИЗАЦИЯ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Н.В. Шумкина*  
Компьютерная верстка *Г.Н. Кирпа*

Подписано в печать 27.03.2024.  
Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать офсетная.  
Объем 4,75 п. л. Тираж 100 экз. Заказ 81.

Издательский дом КРСУ  
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44.