

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ПО ПРЕКТИРОВАНИЮ,
СТРОИТЕЛЬСТВУ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

На правах рукописи

УДК 624.024.021

Усмонов Шерзод Икром ўғли

**ПРИМЕНЕНИЕ АНТИСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ НА
ПРОЕКТИРУЕМЫХ МОСТАХ В ГОРНЫХ РЕГИОНАХ**

5А340205 - Строительство мостов, тоннелей и путепроводов

Диссертация

представлена на соискание академической степени магистра

Научный руководитель:

ст.преп., Мирходжаев Ш.А.

Ташкент - 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
I.1. Землетрясения и причины их возникновения	11
I.2. Анализ воздействий землетрясений на сейсмостойкость мостов.....	16
I.3. Состояние динамических методов расчета при изучении сейсмостойкости мостов.....	23
I.4. Рекомендации норм при проектировании мостов и сейсмическая защита.....	31
I.4. Выводы по главе.....	36
II. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОСТОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНТИСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕМФЕРОВ	37
II.1. Методы сейсмогашения и сейсмоизоляции мостов	37
II.2. Методика расчета мостовых конструкций на сейсмические воздействия.....	48
II.3. Методика расчета элементов сейсмоизоляции и сейсмогашения.....	58
II.4. Выводы по главе.....	61
III. РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА К ИССЛЕДОВАНИЮ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МОСТОВ	62
III.1. Расчет моста с достаточно большой собственной массой.....	62
III.2. Расчет моста с температурно-неразрезным пролетным строением.....	71
III.3. Расчет оценки параметров сейсмозащитных устройств.....	75
III.4. Выводы по главе.....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	87

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Повышение эксплуатационной надежности и долговечности мостовых сооружений – одна из основных задач сохранности и развития дорожной сети Республики Узбекистан. Мостовые сооружения являются наиболее ответственными и сложными элементами автомобильных дорог. На автодорогах эксплуатируется множество различных мостов.

В настоящее время происходит бурное освоение и развитие всё новых и новых территорий. В этих условиях в сейсмически опасных районах проектируется и строится значительное количество мостовых сооружений.

Территория Республики Узбекистан находится также в горной местности и почти все ее районы относятся к сейсмически опасным с близкими возможными очагами землетрясений. В этих местах мосты могут разрушаться от действия и вертикальных составляющих колебания грунта при землетрясениях. В подобных случаях обычно разрушаются опоры, опорные части и пролетные строения. Так как землетрясения происходят с образованием многочисленных трещин различных размеров в земной коре, то при образовании каждой трещины излучаются свои волны. Очаги землетрясений имеют широкий диапазон колебаний, имеющих период от нескольких сотых долей до десятков секунд.

В прошлом крупные события сейсмического характера происходили в Ташкенте, Ташкентской и Бухарской области, и на Ферганской долине. В отличие от гражданских сооружений для мостов важными являются не только вопросы прочности и устойчивости основных несущих конструкций.

В связи с этим тяжесть последствий в результате землетрясений: повреждения, разрушения мостов и возможность возникновения сейсмических воздействий большой разрушительной силы во многих регионах, делают изучения обеспечения сейсмостойкости мостов очень актуальной научно-технической и социально экономической проблемой.

Цель работы. Исследование и изучение сейсмостойкости мостов и путепроводов с применением конструкций антисейсмической защиты. При

этом учитывать возможные направления сейсмической нагрузки на основание и фундамент.

Основными задачами диссертационной работы являются:

- определить современные вопросы и проблемы сейсмостойкости мостовых сооружений на автомобильных дорогах.
- анализировать применимости существующих теорий сейсмостойкости сооружений к изучению и исследованию сейсмостойкости мостов;
- теоретически исследовать работы балочного моста с сейсмоизолирующими конструкциями при воздействии сейсмических нагрузок.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана методология определения сейсмостойкости мостов с применением различных типов антисейсмической защиты на основе вычисления расчётного сейсмического усилия во взаимодействии с грунтовыми условиями.
- произведены расчеты мостов и путепроводов на сейсмостойкость, вычислены значения максимальных горизонтальных и вертикальных сейсмических нагрузок при землетрясениях.

Практическая ценность работы заключается в том, что расчетные методики определения сейсмических усилий и результаты проведенных расчетов сейсмостойкости мостов с антисейсмическими демпферами могут быть рекомендованы для использования проектными и научно-исследовательскими организациями.

Публикации: основное содержание диссертационной работы изложено в 2 публикациях. Работа выполнена в соответствии с календарным планом на 2017-2019 год.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключение, списка литературы. Общий объем работы, составляет 100 страниц сного текста.

ГЛАВА I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

I.1. Землетрясения и причины их возникновения

В недрах нашей планеты непрерывно происходят внутренние процессы, изменяющие облик Земли. Чаще всего эти изменения медленные, постепенные. Точные измерения показывают, что одни участки земной поверхности поднимаются, другие опускаются. Не остаются постоянными даже расстояния между континентами. Иногда внутренние процессы протекают бурно и грозная стихия землетрясений превращает в развалины города, опустошает целые районы [1]. Под угрозой землетрясений находятся обширные территории, многие густонаселенные области и даже целые страны, например Япония, Республика Узбекистан и др. Наибольшая опасность землетрясений заключается в их неожиданности и неотвратимости. Однако научные достижения последних лет открывают реальные возможности не только предсказывать землетрясения, но и влиять на их ход. Землетрясение - это подземные толчки и колебания земной коры, вызываемые чаще всего (в 95 % случаев) тектонической деятельностью. Согласно используемой в мире 12-балльной шкалы землетрясения интенсивностью 6-7 баллов и выше приводят к возникновению опасности для здоровья и жизни людей. Людские потери и материальный ущерб при землетрясениях обусловлены прежде всего степенью разрушения зданий и сооружений в том числе и мостов. Районами наиболее вероятных катастрофических землетрясений являются юго-запад Молдовы, территория Кавказа, Прибайкалье, Камчатка, Курильские острова, Центральная Азия, а территория Кыргызстана полностью относится к сейсмически опасным районам

Землетрясения занимают третье место в мире (после тайфунов и наводнений) по величине причиняемого ущерба. При землетрясениях гибнут тысячи людей, а десятки тысяч остаются без крова [1, 2, 3].

Причиной землетрясений являются, как правило, тектонические деформации коры. В процессе этих деформаций при определенном уровне напряжений происходит внезапное нарушение – образуется дислокация того или иного вида. При этом высвобождается значительная энергия деформации и возникают волны, распространяющиеся по все направлениям. Достигнув поверхности земли, они вызывают землетрясение – колебательное движение верхних слоев грунтовой толщи. Землетрясения возникают обычно в зонах разломов земной коры, где тектонические процессы протекают наиболее активно, а прочность земной коры понижена.

Тектонические землетрясения относятся к группе естественных землетрясений. К этой же группе относятся землетрясения, вызванные движением магмы по подземным каналам и взрывами газа при извержениях вулканов, связанные с обрушением горных пород и падении крупных материков.

Огромную ценность представляют для сейсмостойкого строительства фактические данные, характеризующие поведение сооружений при сильных землетрясениях. Анализ этих данных позволяет выявить характерные повреждения и слабые места конструкций установить сейсмостойкость сооружений, разработать рекомендации по проектированию и наметить конструктивные антисейсмические мероприятия [4]. Изучение последствий сильных землетрясений необходимо для разработки практических вопросов сейсмостойкости сооружений и представляет большой интерес для общей теории сейсмостойкости: выявить распределение сейсмических усилий в сооружениях, служить критерием для оценки теоретических расчетных положений. Вопросы сейсмостойкости дорожных (и других специальных) сооружений разработаны в недостаточной степени. Поэтому изучение поведения дорожных сооружений при сильных землетрясениях отвечает запросам практики проектирования и строительства [5].

Исследование поведения дорожных сооружений расширяет область применения общих положений теории сейсмостойкости позволяет вскрыть некоторые особые закономерности остающиеся незамеченными.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость детального изучения фактических данных о сейсмических повреждениях искусственных сооружений.

Анализ данных о сейсмическом ущербе показал, что воздействие землетрясений силой 7...9 баллов приводит к значительным повреждениям многих сооружений и серьёзным нарушениям работы транспорта вплоть до полного прекращения движения на срок от нескольких дней до нескольких недель.

Как известно, центральная часть Земли представляет собой ядро, которое охвачено твердой оболочкой - мантией. Глубинную часть ее называют нижней мантией, а слой над ней толщиной около 1000 км - верхней мантией. Последняя покрыта земной корой, толщина которой составляет от 5 до 50 км.

Считают, что движения в верхней мантии, приводящее к взаимному смещению слоев земной коры, является причиной землетрясений. Если расстояние между смещающимися участками земной коры мало, пластичность ее оказывается недостаточной; настает момент, когда напряжение в породе, превзойдет предел ее прочности, образуется трещина, и края ее сдвинутся - произойдет землетрясение. В подавляющем большинстве случаев землетрясения происходят в местах расположения существующих разломов земной коры, где ее прочность понижена. В зависимости от характера подвижки по разлому различают землетрясения с механизмом сдвига, сброса и надвига (рис. 1.1). От очага землетрясения к поверхности распространяются два типа сейсмических волн, называемых глубинными: продольные и поперечные.

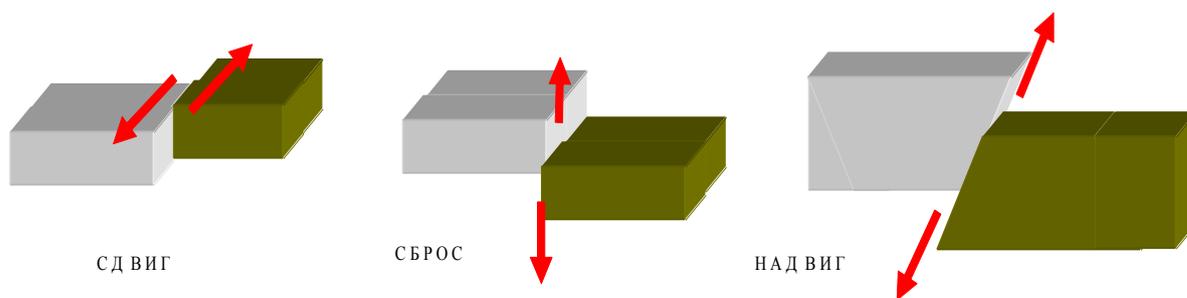


Рис. 1.1. Типы тектонических разломов

Продольные волны определяют сжатие – растяжение элементарного объема грунта. Частицы грунта при этом колеблются в направлении распространения волны.

Поперечные волны (волны сдвига) определяют сдвиговую деформацию элементарного объема грунта. Частицы грунта при этом колеблются перпендикулярно направлению распространения волны.

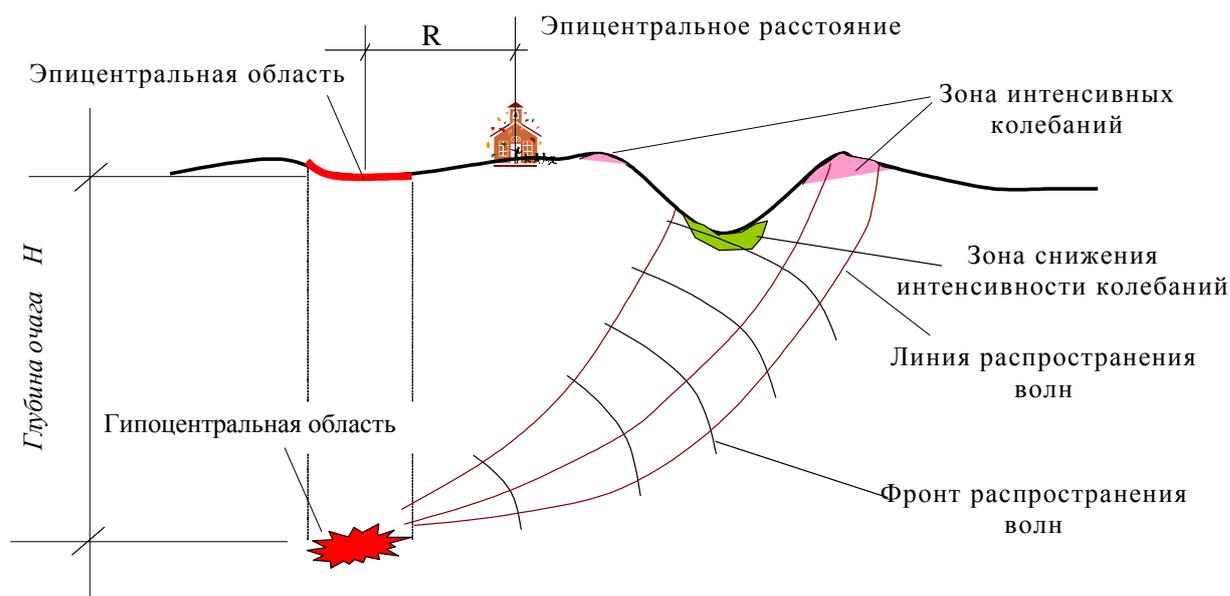


Рис. 1.2. Распространение волн от очага к дневной поверхности

Поперечные волны распространяются примерно 1, 5 раза медленнее продольных. Глубинная область Земли, охваченная этим смещением, называется очагом, или гипоцентром, землетрясения, а проекция этого очага на поверхность Земли - эпицентральной областью. Среднюю точку этой

области называют эпицентром, а расстояние от нее до ее объектов — эпицентральной расстоянием (рис.1.2).

В результате нарушения сплошности земной коры в очаге возникают колебания, которые переносятся на поверхность земли сейсмическими волнами. От очага к поверхности распространяется два типа сейсмических волн: продольные (растяжения - сжатия) и поперечные (сдвига). Как известно, в продольных волнах частицы смещаются вдоль линии распространения волны, а в поперечных - поперек. Отражение глубинных волн от поверхности земли вызывает появление дополнительных поверхностных волн Рэлея и Лява.

О том, что на территории Узбекистана случались землетрясения, известно давно. Однако накопление систематических сведений о них начато лишь во второй половине XIX века.

В Узбекистане активными темпами ведется строительство зданий и сооружений, а также проектируются различного рода сооружения, среди которых значительное количество искусственных сооружений - это железобетонные балочные мосты, путепроводы, виадуки.

Следует отметить, что значительная часть территории Республики Узбекистан является сейсмоопасной зоной. В связи с этим к строительству мостов должны предъявляться высокие требования. Большую часть мостов в республике составляют железобетонные мосты.

Возрастающий год от года активный темп строительства в сейсмоактивных районах Узбекистана требует от сейсмологов надежных сведений о сейсмоопасности микрорайонов и отдельных строительных площадок. Карта общего сейсмического районирования территории республики Узбекистан показана на рис. 1.3.

При всей тяжести последствий землетрясений оказывается, что уменьшение ущерба и безопасность людей могут быть обеспечены при соблюдении нормативных требований к проектированию, строительству и эксплуатации зданий в сейсмических районах.

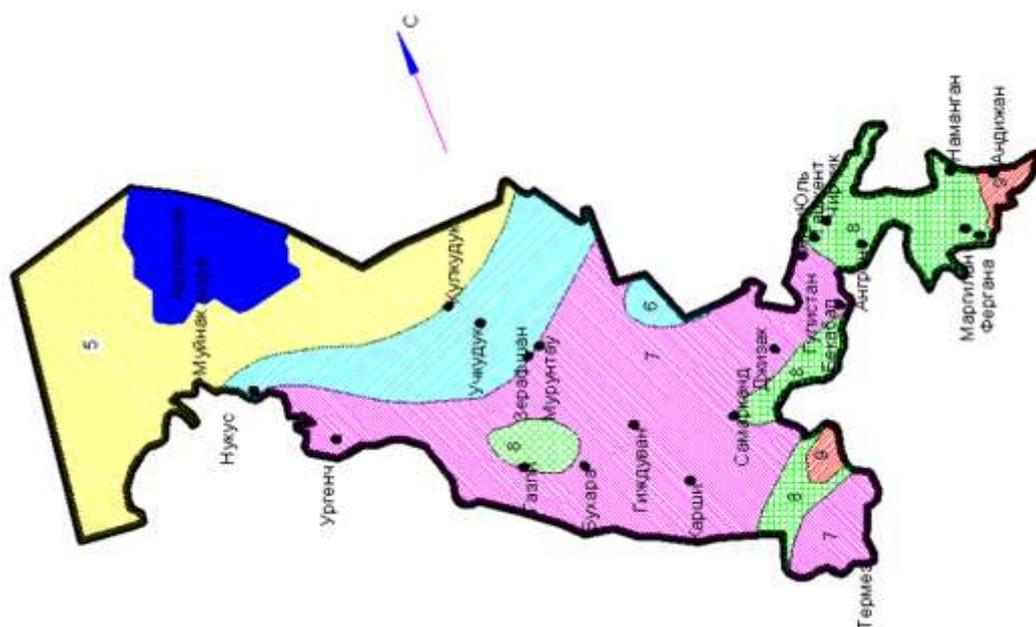


Рис. 1.3. Карта общего сейсмического районирования территории Республики Узбекистан

Тектонические процессы - сложный комплекс физико-химических и механических преобразований в земной коре, переходящий в кинематические изменения положения грунтовых пластов с различной скоростью проявления. Эти процессы являются причиной изменения русла реки, образования возвышенностей, впадин, разрывов на земной поверхности. Протяженные инженерные сооружения через контакт с земной поверхностью получают кинематические воздействия, которые с учетом их статической работы переходят в дополнительное напряженно-деформированное состояние конструкций и при неблагоприятных сочетаниях с другими нагрузками и ослабленным состоянием материалов и конструктивных связей приводят к развитию повреждений.

I.2. Анализ воздействий землетрясений на сейсмостойкость мостов

Во время произошедших ранее землетрясений, много пролётных строений мостов было сброшено с опор и устоев. Анализу таких разрушений посвящено большое количество исследований [7, 8] и др. Примеры таких разрушений приведены на рис. 1.4-1.7.

Одной из причин таких разрушений является разница динамических свойств соседних (смежных) пролётных строений. Соседние пролётные строения мостов часто имеют различные геометрические и физико-механические параметры – длину, массу, жесткости – а также могут опираться на опоры и устои с различными характеристиками конструкций и грунтов. Всё это приводит к тому, что собственные частоты колебаний пролётных строений будут отличаться.

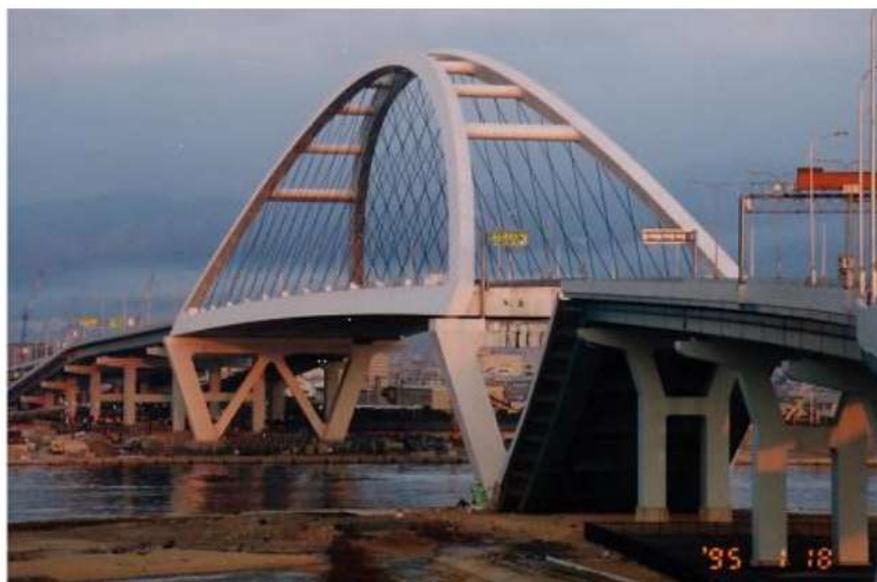


Рис. 1.4. Сброшенные береговые пролётные строения моста Nishinomiya Bridge во время землетрясения 1995 Kobe



Рис. 1.5. Сброшенные пролётные строения путепровода Arifiye (Турция)



Рис. 1.6. Вид разрушенного моста Wu-Shi Bridge при землетрясении Chi Chi (Тайвань)

В таком случае параметры колебаний пролётных строений даже при одинаковых сейсмических воздействиях на основания опор могут существенно отличаться.

Другой причиной сброса пролётных строений являются отличающиеся во времени сейсмические воздействия на отдельные опоры, если опоры расположены на достаточно больших расстояниях друг от друга. Это связано с тем, что скорости распространения волн в грунте имеют конечную величину. Пролётные строения при сейсмических воздействиях могут колебаться в противофазах. Поэтому возможны ситуации, когда произойдет соударение смежных пролетных строений или сброс пролетных строений. Для предотвращения подобного рода разрушений необходимо: во-первых, обеспечить достаточную ширину опорных поверхностей, чтобы обеспечить достаточные смещения пролётных строений, и снабдить специальными демпфирующими и удерживающими устройствами.



Рис. 1.7. Сброшенные пролётные строения моста Showa при землетрясении Niigata в 1964 году

При сейсмических воздействиях могут быть повреждены демпфирующие и удерживающие устройства. Пример таких повреждений демпферов представлен на рис. 1.8.



Рис. 1.8 Поврежденные демпферы и вязкостные ограничители

Для предотвращения сбросов пролётных иметь методика, позволяющую оценивать относительные перемещения смежных пролётных строений.



Рис. 1.9. Вид фрагмента пролётного строения, смещённого относительно опорной части

Смещения пролётных строений при землетрясениях могут быть и вдоль и поперек моста. На рис.1.9 представлена фотография пролётного строения, смещённого в поперечном направлении относительно опорной части.

Фотографии сброшенных при землетрясении пролётных строений можно найти в работе [8, 9]. На рис. 1.10 представлены примеры разрушенных мостов, опирающихся на высокие гибкие опоры. Пролётные строения балочных разрезных мостов более часто сбрасываются при землетрясениях, по сравнению с неразрезными пролётными строениями. Сброс пролётных строений мостов пересекающих зоны активных разломов может так же происходить из-за подвижек грунта. Эти случаи в настоящей работе не рассматриваются. Пролётные строения мостов с опорами, расположенными на достаточно больших расстояниях друг от друга, а так же на опорах различной высоты, будут подвержены воздействиям с различными параметрами. Эти воздействия могут быть сильно или слабо коррелированными в зависимости от расстояния между опорами. В целях точного расчёта реакций таких сооружений на сейсмические воздействия важно учитывать корреляцию между различными входными параметрами воздействий на опоры; в противном случае результаты расчёта реакций могут оказаться неконсервативными (заниженными).

а)



б)



Рис. 1.10. Примеры повреждённых мостов на гибких опорах: а) повреждённые мосты на гибких опорах, б) повреждение моста, расположенного в горной местности

Важнейшими причинами сейсмических повреждений являются следующие:

1. Сейсмические силы горизонтального направления, возникающие при колебательных движениях масс сооружения вследствие колебания грунта основания. Эти силы вызывают сейсмические усилия в сооружениях и в большинстве случаев являются основной причиной их повреждений. Сдвиг и падение с опор пролетных строений мостов, опрокидывание или сдвиг (срез) промежуточных опор являются результатом действия горизонтальных сейсмических сил.

2. Сейсмические силы вертикального направления, вызванные вертикальной компонентой сейсмических колебаний грунта. Эти силы обычно незначительны по сравнению с усилиями от основных нагрузок и редко являются причиной повреждений. Однако они уменьшают полезный

эффект сил трения, снижают запасы устойчивости сооружения в целом или отдельных его частей и тем самым способствуют развитию повреждений от горизонтальных сейсмических нагрузок. От вертикальных и горизонтальных сейсмических воздействий в мостах разрушаются в первую очередь насыпи к подходу моста, пролетные строения, опоры, опорные части, происходят сдвиги и падения пролетных строений с опор, приводящие к прекращению движения транспорта, а иногда к человеческим жертвам.

3. Сейсмическое горизонтальное давление грунта на устои и подпорные стены вызывают дополнительные сейсмические усилия в сооружениях. Они играют решающую роль при повреждениях подпорных стен и устоев мостов.

4. Сейсмическое (гидродинамическое) давление воды на промежуточные опоры мостов.

5. Снижение несущей способности некоторых грунтов при землетрясениях.

В процессе сейсмических колебаний происходит размягчение, разжижение рыхлых водонасыщенных грунтов, переход в текучее состояние. Указанные явления могут быть основной причиной больших осадок мостовых опор на естественном основании или на висячих сваях. Снижение несущей способности грунтов по боковым поверхностям фундаментов опор облегчает их наклон и горизонтальное перемещение при действии сейсмических сил горизонтального направления.

6. Тектонические явления, сопровождающие землетрясения. Возникновение движений по плоскостям тектонических нарушений в процессе землетрясения приводящие к образованию сбросов, сдвигов достигающих до десятка и более метров.

I.3. Состояние динамических методов расчета при изучении сейсмостойкости мостов

Для оценки сейсмостойкости мостов и путепроводов необходимо определять в плоскости подошвы фундаментов на естественном основании

сейсмические усилия и усилия от постоянных и временных нагрузок (изгибающие моменты, горизонтальные и вертикальные силы). Сейсмические нагрузки, действующие вдоль и поперек оси моста и путепровода учитываются отдельно. В зависимости от расположения моста по ориентации к направлению распространения сейсмических волн, различаются два вида их воздействия, передающиеся на конструкции моста через фундаменты и тело опор: продольное, которое действует вдоль мостовой оси, и поперечное. Любые другие направления могут быть представлены в векторной форме по вышеуказанным направлениям.

При возникновении землетрясений возникают:

- силы бокового давления грунтов на фундаменты и опоры моста;
- давление воды, вызванное сейсмическими воздействиями;
- нагрузки инерционные от собственного веса мостовых конструкций и полезная от подвижного состава.

Для расчёта величины сейсмических нагрузок надо знать их количественные характеристики: силы и интенсивности.

Сила землетрясения определяется энергетической характеристикой его очага. Степень локальных разрушений, происшедших в результате сейсмических воздействий, называется интенсивностью. Оценка интенсивности землетрясений происходит в баллах. Повторяемость и интенсивность землетрясений принимается по разработанным картам районирования территории по сейсмическим воздействиям.

Нормативными документами предусмотрено проектирование мостовых переходов для условий семи, восьми и девяти баллов сейсмической интенсивности. Расчёт мостовых опор и элементов в таких районах производится:

- на прочность;
- устойчивость мостовых элементов;
- несущую способность грунтов в основании фундаментов.

В основе действующих в мостостроении нормативных документов лежат методы расчётов по спектральным кривым, при которых определение сейсмических сил происходит по спектральной кривой, характеризующейся максимальным смещением осциллятора (маятника) в зависимости от его периодов колебания и параметров затухания [10, 11, 12,13-20].

В основу этого метода расчёта положены следующие гипотезы:

- недеформированность основания;
- абсолютная упругость материалов моста и его элементов;
- пропорциональность жёсткости мостовых элементов потерям энергии во всей сейсмически колеблющей конструкции.

При расчётах силы и интенсивности сейсмических сил мостовая конструкция заменяется эквивалентной в динамическом отношении расчётной схемой. Эта схема представлена в виде стержневой невесомой системы с закреплёнными на ней массами. Дискретные схемы с конечными количествами сосредоточенных масс и несущие континуальные, распределённые массы, которыми характеризуются инерционные свойства мостовой опорной конструкции. После определения необходимых расчётных параметров пролётных строений и опор, определяются периоды и соответствующие им формы собственных колебаний элементов моста, потому что величины действия сейсмических сил зависят, согласно действующим нормам, от динамических свойств мостового сооружения.

Действующими нормами предусматривается определение величины максимальной величины сейсмических сил при учёте не менее трёх форм собственных колебаний, при условии периода низшей (первой) формы колебаний составляет более 0,4 с. В случае если период колебаний 0,4 с, то нужно только учитывать первую форму колебаний. Как и для любых других расчетов сооружений, для сейсмических расчетов существует свой порядок их проведения. Это ряд операций, осуществляемых последовательно друг за другом:

1. Назначение динамической расчетной схемы.

Это одна из наиболее ответственных операций расчета, обуславливающая степень достоверности и точности результатов. Динамическая расчетная схема должна по возможности полнее отражать свойства сооружения, картину его деформирования под действием горизонтальных сил и характер сейсмических колебаний. В частности, динамические расчетные схемы мостов должны учитывать совместные горизонтальные колебания опор и пролетных строений. Их составляют для сооружения в целом или отдельных его частей, способных совершать самостоятельные колебания в процессе сейсмического воздействия. Для получения расчетных схем дискретного типа фактическую распределенную вертикальную нагрузку сооружения группируют по отдельным участкам и представляют в виде сосредоточенных грузов, приложенных в центрах тяжести соответствующих участков.

2. Вычисление сосредоточенных масс расчетной схемы. Массы вычисляются по собственным весам конструкции и весам других элементов, порождающих силы инерции. При этом гидростатическое воздействие на подводную часть опор, выталкивающее действие воды не отражается на силах инерции и не учитывается. Наличие нормативной временной нагрузки с момент землетрясения учитывается с понижающими вероятностью их одновременного действия коэффициентами сочетаний.

Находящаяся на мосту пешеходная нагрузка на тротуары, имеющая гибкую связь с настилом пролетного строения, не может дать сколь-либо значимую сейсмическую нагрузку и не учитывается.

3. Динамические расчеты с определением форм и периодов собственных колебаний и определение модальной сейсмической нагрузки. Каждая модальная сейсмическая нагрузка прикладывается к сооружению как внешняя статическая. Расчетная сейсмическая сила определяется как совокупность модальных нагрузок по известным формулам. На современном этапе развития расчетов по-прежнему обоснование расчетных схем является критическим. Конечно, элементные модели мостов могут сталкиваться с

теми же вопросами, как и простейшие консольные балки. Каждая динамическая расчетная схема моста уникальна, и определение ее в какой-то мере зависит от квалификации инженера-расчетчика. Ниже условно рассматриваются расчетные модели как продольные, так и поперечные. Масса пролетного строения может по-разному включаться в зависимости от направления расчета.

Продольные сейсмические нагрузки. Расчетные динамические модели наиболее часто встречающихся конструкций мостов при продольных колебаниях можно разделить на следующие группы:

1. Балочные мосты с пролетными строениями, имеющими подвижные опорные части с малыми коэффициентами трения. К таким сооружениям относятся мосты, имеющие опорные части каткового, секторного, валкового типа. Отдельные части таких мостов, разделенные подвижными опорными частями пролетных строений, совершают продольные колебания как независимые системы. Примеры таких мостов приведены на рис. 1.11. Могут встречаться следующие варианты [21, 22]:

– промежуточная опора с одним пролетным строением на неподвижной опорной части – рис. 1.11 (а);

– то же, с двумя пролетными строениями на неподвижных опорных частях – рис. 1.11 (б);

– береговая опора (устой) с пролетным строением на неподвижной опорной части – рис. 1.11 (в);

– то же, без пролетного строения – рис. 1.11 (г);

– промежуточная опора без пролетных строений (пролетные строения с двух сторон имеют на опоре подвижные опирания); – рис. 1.11 (д).

Необходимо при разбивании конструкции на отдельные части учитывать передачу инерционных нагрузок. Как видно из рис. 1.12, продольные сейсмические силы передаются с пролета на опоры через неподвижные опорные части. Распределённые нагрузки от собственного веса опоры дискретно сосредотачиваются по оси опоры, масса

пролетного строения прикладывается к вершине опоры в месте расположения неподвижной опорной части целиком, так как продольная инерционная нагрузка будет восприниматься только этой опорой.

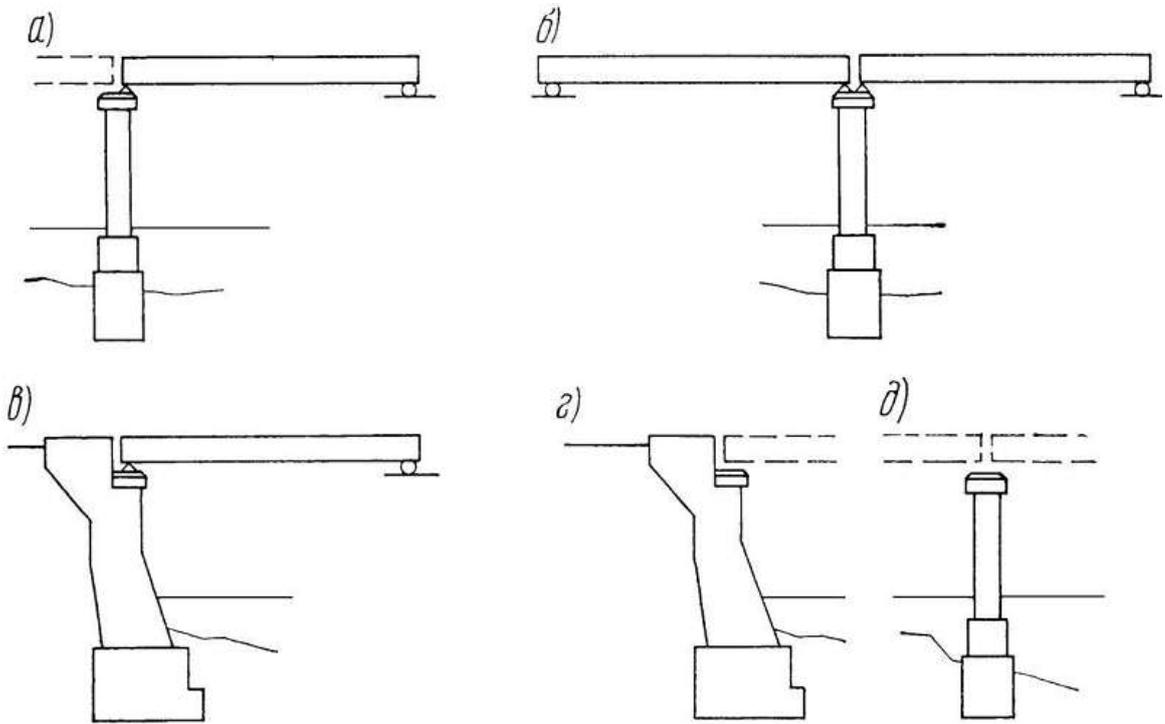


Рис. 1.11. Схемы отдельных частей моста, рассматриваемых как самостоятельные колебательные системы

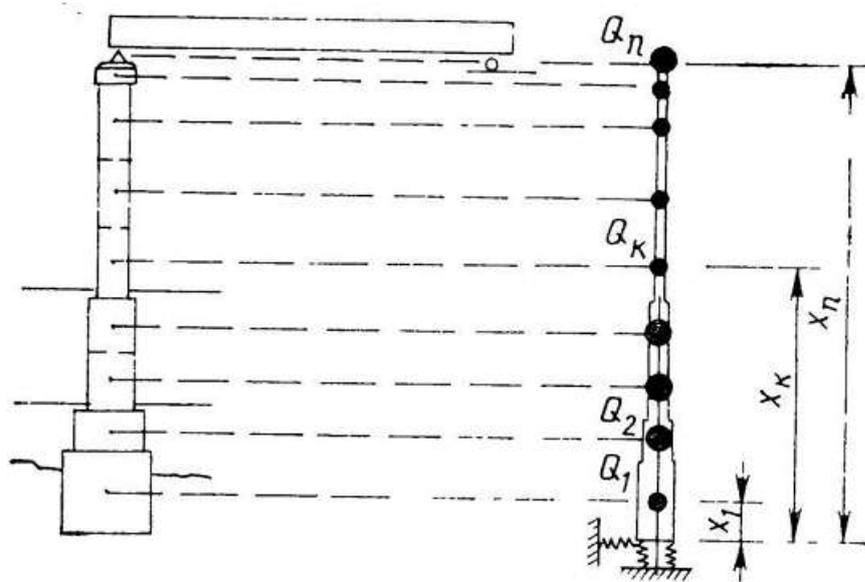


Рис. 1.12. Схема промежуточной опоры при продольных колебаниях

Так, динамическая схема промежуточной опоры по направлению вдоль моста выглядит следующим образом (рис. 1.13).

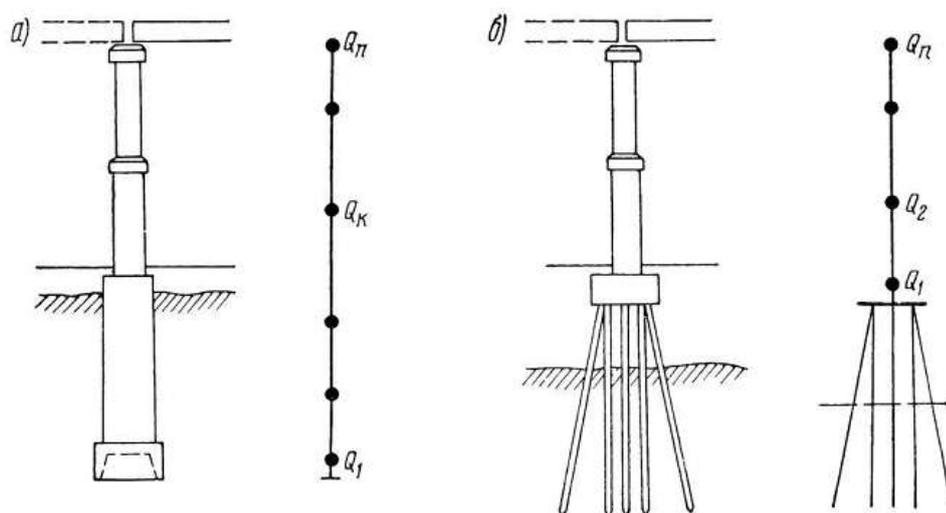


Рис. 1.13. Схема опор с различными типа фундаментов
(а – мелкого заложения; б – фундамент со свайным ростверком)

Следует учитывать также веса фундаментных частей опор, к которым прикладываются инерционные нагрузки. Так, вес фундаментов мелкого заложения рассредоточивается в двух-трех точках, вес свайного ростверка – в центре его тяжести (рис. 1.13). Наиболее подробно эти соображения изложены в [24-29]. При применении в моделировании МКЭ точками сосредоточения масс вполне могут являться узлы соединения балочных элементов.

2. Балочные мосты с пролетными строениями, имеющими подвижные опорные части с большим коэффициентом трения. К таким мостам относятся пролеты с плоскими, тангенциальными опорными частями. В этом случае силы трения в опорных частях при землетрясении преодолеваются частично, и часть инерционной нагрузки с пролетных строений передается на обе опоры одновременно. В наиболее невыгодном случае, когда силы трения полностью передают перемещения с пролета на опоры, в верхний сосредоточенный груз передается полусумма весов пролетных строений, опирающихся на опору [31-32].

Отдельного внимания заслуживают резиновые и маятниковые самоцентрирующиеся опорные части, превращающие мост в единую

колебательную систему. Решение таких задач, как правило, проводится созданием единых схем на базе метода конечных элементов.

Поперечные сейсмические нагрузки. При поперечных колебаниях в простейшем случае, когда пролетные строения имеют призматическое (или близкое к нему) очертание и относительно небольшую высоту, расчетная схема представляется в виде плоской решетки невесомых стержней, несущих сосредоточенные грузы и испытывающих деформации поперек плоскости решетки (рис. 1.14). Опирающиеся пролетные строения на опоры представляют собой шарниры с вертикальной осью вращения [33]. Схема в целом рассматривается как единая колебательная система.

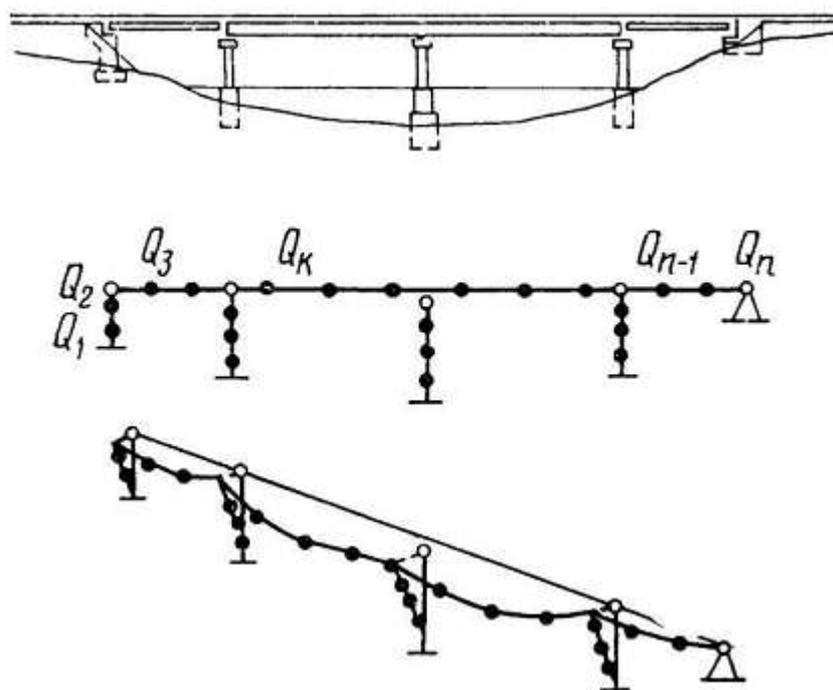


Рис. 1.14. Схема моста при поперечном воздействии

Таким образом, в настоящее время в соответствии с действующим ныне ШНК 2.01.20-16 формула для определения сейсмических нагрузок S_{ij} на массу m_i по j -й форме колебаний имеет вид:

$$s_{ij} = K_1 \cdot A \cdot g \cdot m_i \cdot \beta_1(T_j, \gamma_j) \cdot K_w \cdot \eta_{ij} \quad (1.1)$$

где S_{ij} – сейсмическая нагрузка по j -й форме колебаний, действующая на массу m_i ;

$\beta(T_j, \gamma_j)$ – коэффициент динамики, зависящий в общем случае от периода собственных колебаний по j -ой форме T_j , коэффициента неупругого сопротивления γ_j и вида воздействия (расчетной акселерограммы основания (t));

η_{ij} – коэффициент формы, учитывающий распределение инерционных нагрузок по формам колебаний;

g – вес сооружения, отнесенный к точке k ;

A – коэффициент, значения которого следует принимать 0.1, 0.2, 0.4 для сейсмичности 7, 8, 9 баллов;

K_j – коэффициент предельных состояний;

K_ψ – коэффициент затухания.

I.4. Рекомендации норм при проектировании мостов и сейсмическая защита

При проектировании мостов нормами рекомендуется большие мосты располагать вне зон тектонических разломов, на участках речных долин с устойчивыми склонами. Из фундаментальной геологии известно, что речная сеть чаще всего совпадает с простираем тектонических разломов, поэтому такие рекомендации весьма сложно выполнить. Но активность тектонических разломов существенно отличается. Поэтому в период проведения изыскательских работ следует собрать материалы научно-исследовательских институтов Академии наук и других организаций, позволяющих оценить направление и количественные показатели подвижек разломов в зоне пересечения их мостом. Вероятные подвижки в зонах разломов составляют, как правило, значения в единицах сантиметров и могут быть учтены при расчете мостовых конструкций. Нормами рекомендуется также применять мосты балочной системы с разрезными и неразрезными пролетными строениями.

Опыт мирового мостостроения показывает, что в сейсмически активных зонах эксплуатируются мосты различных систем: арочных, рамных,

вантовых и висячих, а разрушения конструкций при катастрофических землетрясениях касаются всех мостов независимо от систем. Поэтому данные рекомендации не бесспорны. При расчете мостов с учетом сейсмических воздействий нормы требуют выполнять по прочности и устойчивости конструкций, а также по несущей способности грунтовых оснований фундаментов. Расчет выполняется как при наличии подвижного состава, так и без него. При расчетной сейсмичности 9 баллов проектами мостов с балочными разрезными пролетными строениями длиной более 18 м следует предусматривать сцепные антисейсмические устройства для предотвращения падения пролетных строений с опор. При расчетной сейсмичности 9 баллов сейсмостойкие опорные части должны воспринимать отрицательные вертикальные опорные реакции, не допуская подбрасывания пролетных строений при землетрясении. При расчетной сейсмичности 9 баллов размеры подферменной плиты в балочных мостах с разрезными пролетными строениями длиной $l > 50$ м следует назначать такими, чтобы в плане расстояние вдоль оси моста от края площадок для установки опорных частей до граней подферменной плиты было не менее $0,005l$.

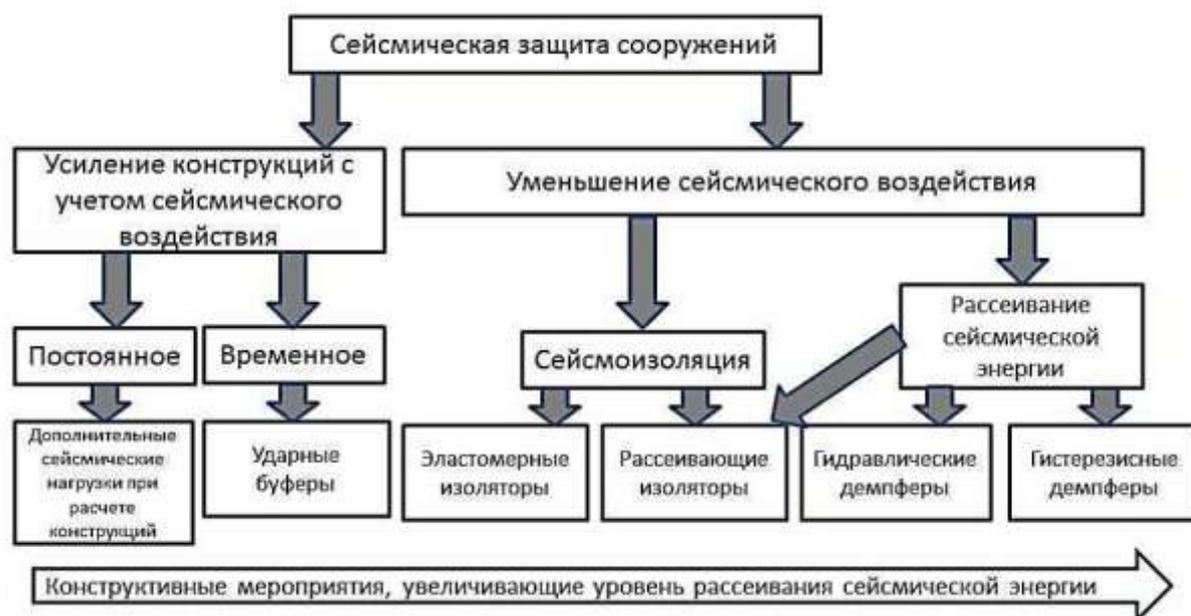


Рис. 1.15. Стратегии сейсмостойкого проектирования и способы сейсмозащиты сооружений

При проектировании мостов, особенно балочных конструкций, особое внимание уделяется созданию конструктивной защиты пролетных строений [30, 31].

Стратегии проектирования сейсмической защиты сооружений, а также перечень типов устройств антисейсмических устройств приведены на рис. 1.15. Буферные устройства призваны смягчить неблагоприятные последствия ударов пролетных в ограничители горизонтальных перемещений. К эластомерным и рассеивающим изоляторам относятся различные типы резиново-металлических опорных частей, в том числе со свинцовыми сердечниками (рис. 1.16 а, б), скользящие маятниковые, в том числе самоцентрирующиеся опорные части (рис. 1.16, в).

Для перераспределения сейсмических воздействий и рассеивания колебательной энергии конструкций используют различные демпферные устройства, которые могут иметь как вязкие, так и гистерезисные свойства (рис. 1.15, г). При достаточной прочности несущих конструкций на сочетания нагрузок с сейсмическим воздействием, перемещения пролетных строений моста могут оказаться достаточно большими. В таком случае требуется конструктивно предотвратить эти перемещения, позволив пролетному строению перемещаться под статическими нагрузками.

Для предотвращения подбрасывания пролетных строений их закрепляют к опоре с обоих концов за середины домкратных балок с помощью анкеров стальной шарнирной конструкции (рис. 1.17, а), применяют более усиленные опорные части, железобетонные стопоры. Стопоры предотвращают смещение балок поперек оси пути, анкера препятствуют опрокидыванию конструкций и подбрасыванию балок (рис. 1.17, б). На металлических фермах используют сцепные устройства ферм, способные выдержать опорную реакцию конструкции, ограничивают относительные вертикальные перемещения смежных концов соседних ферм.

В практике проектирования известны случаи применения сейсмоизоляции на железнодорожных и автодорожных мостах. При этом

сейсмоизолирующие опорные части блокируются специальными элементами и не работают при эксплуатационных нагрузках. Такие решения повышают сейсмостойкость мостов только при действии редких сильных землетрясениях и требуют усиления опор на действие проектных землетрясений. В Узбекистане отсутствуют проекты с современными сейсмоизолированными конструкциями в мостах.

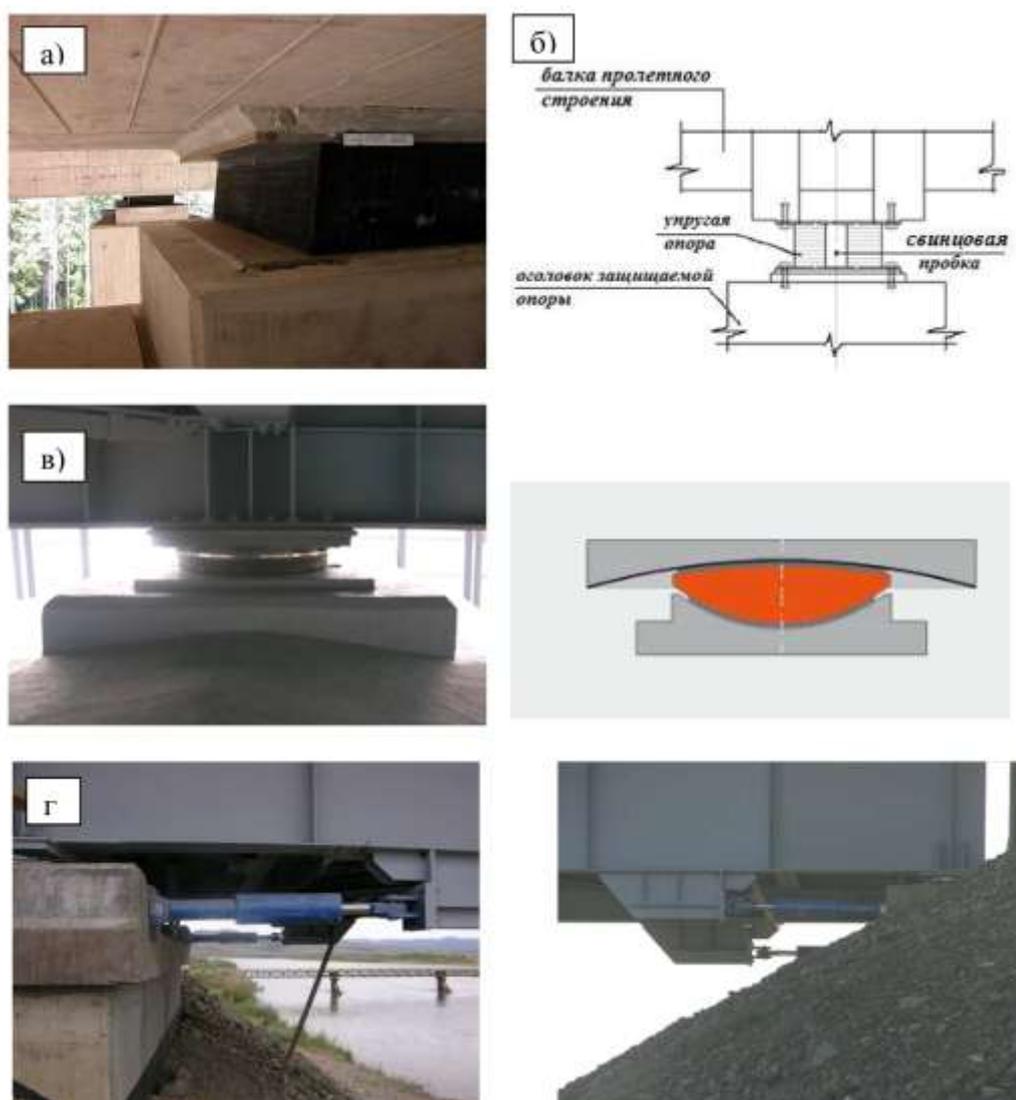


Рис. 1.16. Меры активной сейсмозащиты пролетных строений

а) резиново-металлические сейсмоизолирующие опорные части; б) то же со свинцовыми сердечниками; в) самоцентрирующиеся маятниковые опорные части; г) гидравлические демпферы

Норма (ШНК 2.05.03-12 «Мосты и трубы») содержит ограничения на смещения пролетного строения относительно опоры. Нормы требуют, чтобы величина взаимного смещения U была:

$$U=0.5\sqrt{L} \quad (1.2)$$

где U – перемещение, см; L – длина пролетного строения, м. При таком жестком ограничении период колебаний моста не должен превосходить величину порядка 1.1-1.3 с, а парциальный период существующих опорных устройств составляет 2-4 с.



Рис. 1.17. Меры конструктивной сейсмозащиты пролетных строений

а) анкеры между опорами и пролетными строениями;

б) сейсмические стопоры

Применяются методы рассеяния энергии и изолирования конструкции. Современные конструкции, защищенные от воздействия землетрясений, используют новейшие технологические достижения. Гибкое соединение между конструкцией и ее фундаментами значительно снижает количество сейсмической энергии. Разъединение зоны контакта сооружения и сотрясаемого подстилающего слоя грунта с помощью изоляторов позволяет конструкции оставаться в своем положении без возникновения ускорений и деформаций, вызываемых землетрясением.

1.5. Выводы по главе

Республики Узбекистан в целом, относится к государству, на территории, которой происходят землетрясения разрушительной силы. В прошлом крупные события сейсмического характера происходили в Ташкенте, Ташкентской и Бухарской области, и на Ферганской долине.

В отличие от гражданских сооружений для мостов важными являются не только вопросы прочности и устойчивости основных несущих конструкций, но и вопросы работоспособности опор, обеспечение устойчивости и сейсмостойкости при сильных землетрясениях. Так как землетрясения происходят с образованием многочисленных трещин различных размеров в земной коре, то при образовании каждой трещины излучаются свои волны.

Очаги землетрясений имеют широкий диапазон колебаний, имеющих период от нескольких сотых долей до десятков секунд. Распространяемая сейсмическая волна, воздействует и передается на конструкции моста через фундаменты и тело опор. Уязвимость мостов к сейсмическим воздействиям весьма значительная. При расчете мостов с учетом сейсмических воздействий нормы требуют выполнять по прочности и устойчивости конструкций, а также по несущей способности грунтовых оснований фундаментов. Расчет выполняется как при наличии подвижного состава, так и без него. При расчетной сейсмичности 9 баллов проектами мостов с балочными разрезными пролетными строениями длиной более 18 м следует предусматривать сцепные антисейсмические устройства для предотвращения падения пролетных строений с опор.

Стратегии проектирования сейсмической защиты сооружений, делают изучения обеспечения сейсмостойкости мостов очень актуальной научно-технической и социально экономической проблемой.

В связи с этим целью работы является исследование и изучение сейсмостойкости мостов и путепроводов с применением различных типов антисейсмической защиты. При этом учитывать возможные направления сейсмической нагрузки на основание и фундамент.

II. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОСТОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНТИСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕМФЕРОВ

II.1. Методы сейсмогашения и сейсмоизоляции мостов

В рамках защиты сооружений от сейсмических воздействий разработаны высокоэффективные гидравлические демпферы, позволяющие ограничить воздействующие усилия на заданном проекте расчетном уровне. Функцию демпфирования сейсмических воздействий выполняют эластомерные опорные части со свинцовыми сердечниками. Совершенно новыми в этом направлении являются Mauger-сферические маятниковые опорные части скольжения, предназначенные для сейсмоизоляции сооружений. В отличие от известных в этой области маятниковых опорных частей трения американского производства, опорные части с применением в них материала «MSM®» обладают очень низким трением и, как следствие, очень высокой степенью изоляции [23-28] (рис.2.1).



Рис. 2.1. Конструкция опорной части с применением материала «MSM®»

Гидравлический амортизатор MHD MAURER (рис. 2.2) внешне мало отличается от многих других устройств, разработанных ранее.

Существенное техническое отличие – наличие классического гидравлического цилиндра, в котором сила противодействия является функцией от расхода жидкости, перетекающей между его камерами. Такая система обеспечивает практически неизменную силу противодействия, независимо от внешней действующей скорости и температуры. При этом возможность рассеяния механической энергии, которая передается землетрясением на конструкцию, будет максимизирована, что гарантирует значительную степень защиты конструкции.



Рис. 2.2. Гидравлический амортизатор MHD MAURER

Гидравлический амортизатор MHD от компании «Maurer Soehne» может рассматриваться как устройство, обладающее способностью поглощать объемные колебания гидравлической жидкости, которые создаются изменением температуры окружающей среды, и, прежде всего, наиболее значительные колебания, возникающие во время землетрясения. Это устройство представляет собой интегральную внутреннюю часть всего устройства гидравлического амортизатора.

Амортизатор MHD компактен и не имеет каких-либо выступающих наружу и уязвимых деталей. Устройство передачи ударных воздействий MSTU MAURER является гидравлическим устройством для обеспечения

жесткого соединения конструкционных частей, которые в обычных условиях являются подвижными, без значительного усилия. Очень малые смещения, обусловленные температурными изменениями и ползучестью/усадкой, вызывают небольшие силы противодействия в устройстве MSTU.

При возникновении неожиданных ударных ускорений, что наблюдается при землетрясениях или торможении транспортных средств, сопровождающихся повышенными скоростями относительного смещения между пролетными строениями и ниже расположенными конструкциями, которые превышают, примерно 0,1 мм/с, устройство MSTU реагирует значительным увеличением силы противодействия. После чего устройство блокирует любое относительное смещение между соединенными деталями конструкции. Устройство MSTU имеет следующие характеристики:

- два направления действия;
- отсутствует предварительное напряжение, поскольку при обслуживании внутреннее давление равно нулю;
- все компенсирующие контейнеры и клапаны расположены внутри;
- нет необходимости регулировки;
- максимальное усилие может быть точно ограничено, в случае возникновения непредвиденных высоких нагрузок, конструкция и устройство MSTU не получают существенных повреждений;
- отсутствует необходимость проведения работ по техническому обслуживанию; рекомендуется проводить визуальный осмотр в рамках периодического осмотра моста;
- малые размеры и простота установки;
- диапазон температур: от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- сферические шарниры на обоих концах устройства для подгонки с учетом монтажных допусков.

Полуактивный амортизатор MAURER разработан в рамках Европейского исследовательского проекта для обеспечения строительства

с учетом современных технологий. Область их применения – очень узкие конструкции (например, пешеходные мосты, филигранные конструкции покрытий), сооружения в регионах с высокой сейсмической активностью, – т.е. случаи, когда необходимо использовать специальные стратегии для преодоления динамической реакции конструкции. При проектировании основной конструкции необходимо обеспечить соответствие динамической реакции допустимому уровню деформаций и внутренних реакций, или применение дополнительных амортизирующих элементов, снижающих деформации и реакции до допустимых значений.

Полуактивные амортизаторы, включающие требуемые компоненты – алгоритмы управления и оборудование, магнетореологические жидкости, аппаратуру, были успешно испытаны как в лабораторных условиях, так и на эксплуатируемых сооружениях. Фрикционные амортизирующие вибропоглотители. Многодисковые фрикционные вибропоглотители MAURER разработаны в двух версиях:

- многодисковый фрикционный вибро-поглотитель с одиночной массой маятника;
- многодисковый фрикционный вибропоглотитель с кольцевой массой маятника.

В основном превалирует последний из перечисленных тип рассеяния, в соответствии с которым устройство классифицируется как вязкостный амортизатор. Амортизаторы такого типа используются как на пешеходных мостах, так и канатных висячих мостах и арочных мостах. Для вантовых мостов могут быть применены демпферы для гашения колебаний вант. В этой области разработано решение, позволяющие изменять параметры гашения в зависимости от величины воздействия и таким образом существенно снизить время гашения. Для пешеходных мостов разработаны специальные гасители колебаний. Их конструкция позволяет корректировать параметры гашения в соответствии с фактическими значениями собственных колебаний пролетных строений.

Задачей гидравлических демпферов является обеспечение практически беспрепятственных перемещений при медленных (температурных) перемещениях, блокирование перемещений при увеличении скорости перемещений (вследствие сейсмических толчков, ветра, резкого торможения и т. п.) до возникновения в демпфере заданной проектом расчетной ответной реакции, а при ее превышении — перемещение, при котором происходит поглощение энергии воздействия за счет ее преобразования в тепловую энергию (рис.2.3-2.4).

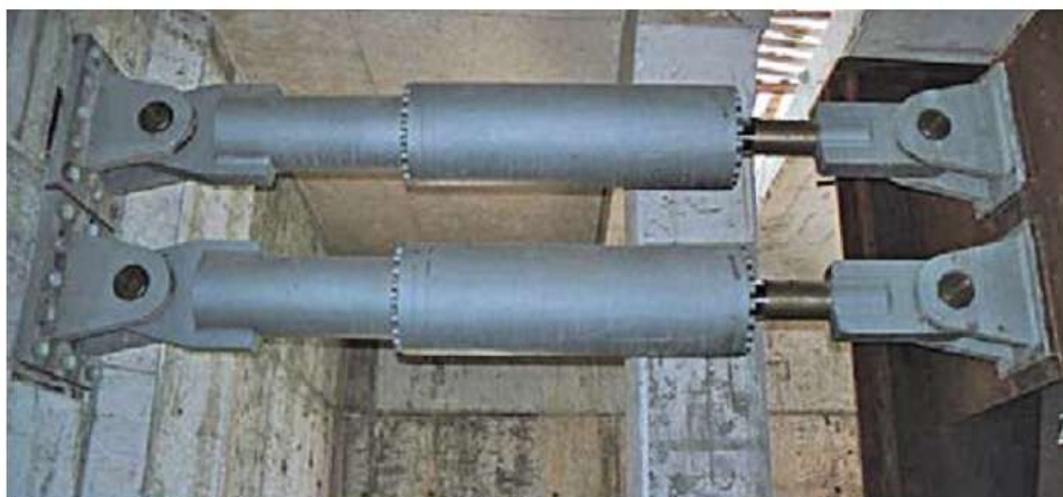


Рис. 2.3. Внешний вид гидравлического демпфера

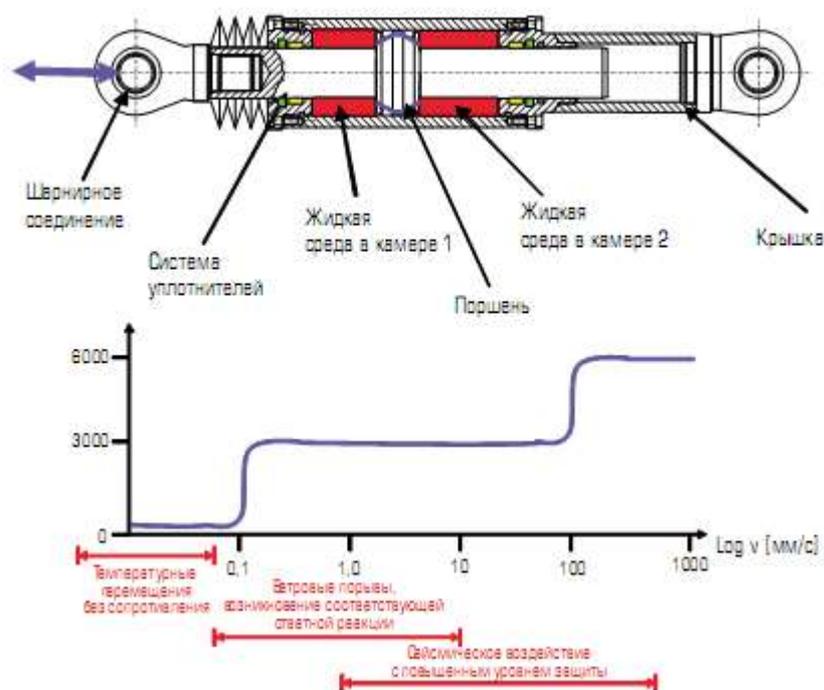


Рис. 2.4. Основные элементы гидравлического демпфера

Проблемы сейсмогашения и сейсмоизоляции мостов рассматривались ранее многими специалистами: И.О. Кузнецовой, А.М. Уздиным и С.А. Шульманом, З.Г. Хучбаровым, А.А. Никитиным и А.Ю. Симкиным, Д.Коллингсом, Диссарно, Р.Гомезом, Х.Иемуры, П.Хубером, С.Инфанти, Е.Джеранимо, Б.Бессасоном и др. Сложность анализа систем сейсмозащиты мостов связана в значительной мере с тем, что возможны четыре принципиально разных типа сейсмоизоляции, требующие различных подходов к задаче подбора параметров и оптимизации сейсмозащитных устройств мостов. Эти типы сейсмоизоляции применительно к продольным колебаниям мостов детально рассмотрены в работе [30] и описаны ниже.

Простая сейсмоизоляция предусматривает устройство податливых сейсмоизолирующих опорных частей вместо традиционных неподвижных на каждой из опор (рис. 2.5). Стратегия подбора параметров простой сейсмоизоляции освещена в литературе [26, 31]; она зависит от отношения ν массы пролетного строения к приведенной кверху массе опоры.

При $\nu < 2$ существует оптимальная настройка податливой опорной части по жесткости и демпфированию. Пролетное строение выступает в этом случае как динамический гаситель колебаний опоры [26].

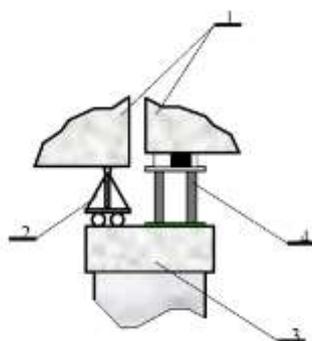


Рис. 2.5 - Простая сейсмоизоляция

- 1 – пролетные строения; 2 – подвижная опорная часть; 3 – оголовок опоры;
4 – гибкая опорная часть.

При $\nu > 2$ оптимальная настройка отсутствует. В этом случае целесообразно делать изолирующие опорные части по возможности более

податливыми. При этом необходимо обеспечить прочность изолирующей опорной части и необходимый ход подвижной опорной части. Этот вопрос детально рассмотрен в [26].

Объединяющая сейсмоизоляция предусматривает устройство податливых сейсмоизолирующих опорных частей вместо всех традиционных (неподвижных и подвижных) на каждой из опор (рис.2.6). При этом сейсмоизолирующие опорные части объединяют мост в единую рамную систему с упругим присоединением ригеля (пролетного строения) к стойкам (опорам).

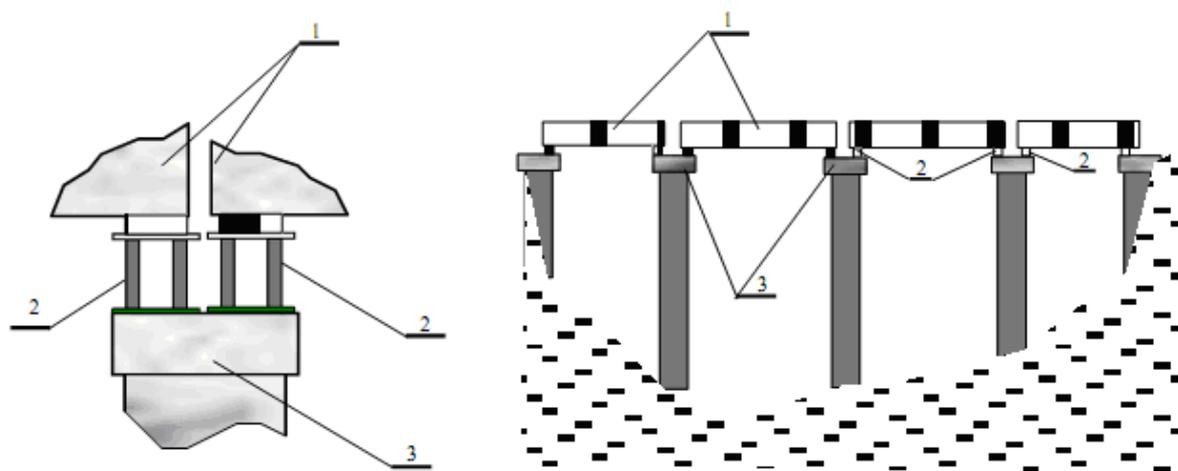


Рис.2.6. Объединяющая сейсмоизоляция: 1- пролетные строения, 2 - гибкая опорная часть, 3 – оголовок опоры

Объединяющая сейсмоизоляция является основным техническим решением сейсмозащиты небольших автодорожных мостов. Такая схема открывает широкие возможности перераспределения нагрузки между опорами моста. Именно с целью разгрузки высоких русловых опор и передачи ее на жесткие устои рассматриваемый тип сейсмоизоляции нашел широкое применение в Европе, США и других странах.

Необходимо отметить, что в имеющихся исследованиях не ставилась задача оптимизации параметров рассматриваемого типа сейсмоизоляции. Как правило, на всех опорах устанавливаются одинаковые сейсмоизолирующие (обычно резиновые) опорные части. Задача использования одного или двух

пролетных строений в качестве динамического гасителя продольных колебаний, объединенного в цепочку моста, не рассматривалась в литературе, хотя эффективность такого рода решений может быть достаточно высокой.

Ограниченная область применения объединяющей сейсмоизоляции связана с необходимостью обеспечения температурных перемещений концов пролетных строений. Обычно удается запроектировать рассматриваемую систему сейсмоизоляции для мостов длиной до 100 м при пролетах до 30 м.

Сильно демпфированная сейсмоизоляция предусматривает установку параллельно с сейсмоизолирующими опорами специальных демпферов, причем сила сопротивления в демпферах соизмерима или даже превосходит восстанавливающую силу в опорной части. Необходимость устройства подобной изоляции возникает в двух случаях:

- В случае простой сейсмоизоляции при $\nu > 2$. В этом случае система начинает работать как демпфер Ланчестера [26, 33] и для оптимизации работы системы необходимо резкое повышение демпфирования в системе сейсмоизоляции;

- В случае, когда по условиям обеспечения сейсмостойкости необходимо перераспределение усилий между опорами, а объединяющая сейсмоизоляция не обеспечивает необходимых температурных перемещений пролетных строений.

Следует отметить, что величина параметров демпфирования для указанного типа сейсмоизоляции, хотя и должна быть значительной, имеет оптимальное значение. Этот известный в механике факт описан в литературе [30] и проиллюстрирован на рис. 2.7 амплитудно-частотной характеристикой для балочного моста регулярной структуры с массой каждого пролетного строения $m=500\text{т}$, и приведенной массой опор $m_0=100\text{ т}$ ($\nu=5$) при парциальном периоде колебаний опор $k=21\text{с}^{-1}$.

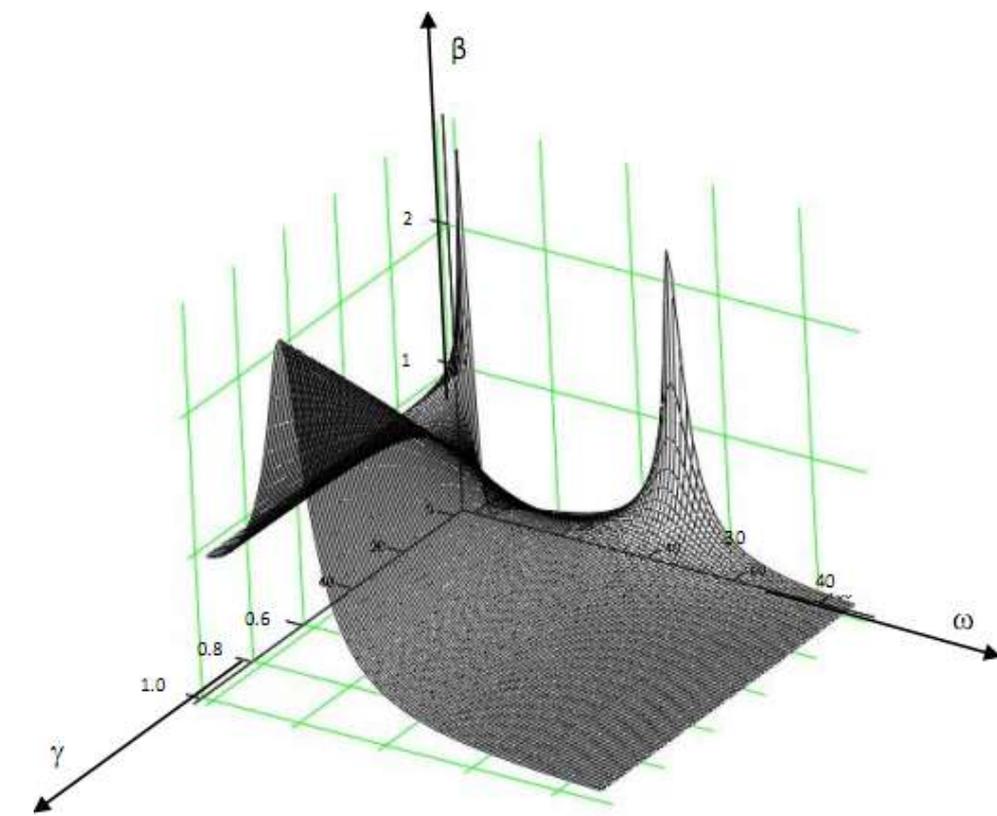


Рис. 2.7. АЧХ системы в зависимости от потерь энергии в демпфере

В качестве демпфера рассмотрен обычный вязкий демпфер, характеризуемый коэффициентом вязкого демпфирования $b = \gamma k m_0$. Гистерезисное затухание в материале опоры γ_0 принято равным 0.07, а в опорных частях $\gamma_i = 0.05$. На рисунке четко видны три пика. При малой величине γ проявляются обычные резонансные пики, соответствующие первой и второй формам колебаний изолированной опоры. С увеличением γ эти пики исчезают, и появляется новый пик, соответствующий случаю жесткого объединения опоры с пролетным строением.

Значительное превышение сил демпфирования приводит к росту инерционных нагрузок и снижению эффективности сейсмоизоляции, а недостаточное демпфирование приводит к большим взаимным смещениям опор и сбросу с них пролетных строений.

Система динамического гашения колебаний предусматривает поочередную установку пары сейсмоизолирующих опорных частей на каждую вторую опору.

Между опорами с гибкими опорными частями располагаются опоры с подвижными опорными частями (рис.2.8).

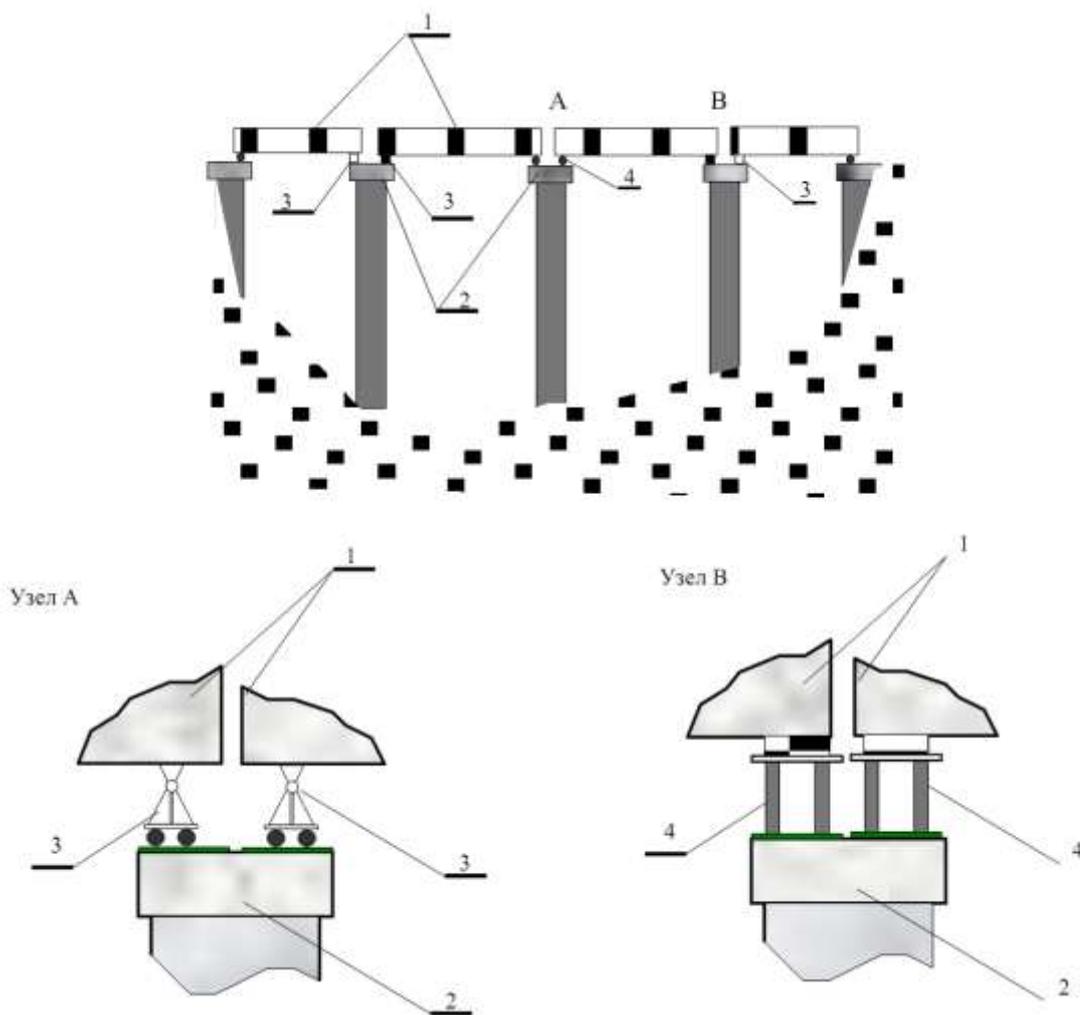


Рис.2.8. Объединяющая сейсмоизоляция: 1– пролетные строения; 2 – оголовок опоры; 3 – подвижная опорная часть; 4 - сейсмоизолирующая опорная часть

Настройка рассматриваемой системы по жесткости и демпфированию позволяет обеспечить эффективное гашение сейсмических колебаний. Если при этом величина ν для каждого из пролетных строений менее двух, то для настройки гибких опорных частей в [23] получены формулы для $\nu_1 = \nu_2$

$$f_1 = \frac{1}{2.48}(\nu + 0.13)^{-0.434} \quad f_2 = -0.72\nu + 1.04$$

$$\gamma_1 = 2\left[\left(\frac{\nu}{45}\right)^{0.07} - 0.505\right]f_1 \quad \gamma_2 = 2\left[\left(\frac{\nu}{5}\right)^{0.377} - 0.038\right]f_2$$

где $f_i = \frac{k_i}{k}$ - настройка i -ой гибкой опорной части; k_i - парциальная

частота колебаний i -ого пролетного строения на гибкой опорной части;

γ_i - коэффициент неупругого сопротивления i -ой гибкой опорной части.

Если хотя бы одна из масс пролетных строений более критического значения ($v > 2$), то необходимо проведение исследований по оптимизации параметров гибких опорных частей. Имеющиеся исследования показывают, что при «удачной» настройке можно добиться многократного снижения расчетных усилий при проектном землетрясении и повреждаемости опоры при максимальном расчетном землетрясении [22, 32].

Понимание необходимости сильного демпфирования систем сейсмоизоляции привело к созданию новых демпфирующих устройств.

Прежде всего, появились металлические сплавы, позволившие создать элементы, выдерживающие значительное количество циклов пластических деформаций и рассеивающих при этом значительное количество энергии. Консольные конические стержни из этих сплавов устанавливаются между верхним и нижним опорными листами сейсмоизолирующей опоры и обеспечивают эффективное рассеяние сейсмических колебаний. Наибольшее распространение такого рода элементы получили в мостах.

Широкое применение в системах сейсмоизоляции приобрели вязкие демпферы, выпускаемые в настоящее время всеми ведущими фирмами мира.

Эффективность работы таких демпферов обеспечивает специально подобранная рабочая жидкость. Во многих конструкциях качестве рабочей жидкости выступает свинец и его сплавы. Наиболее просто обеспечивается повышенное 1.04 демпфирование резиновых опор за счет вставки в опору свинцового сердечника. Новая технология демпфирования связана с применением фрикционно-подвижных болтовых соединений [21-32].

Для описания работы новых типов демпфирующих устройств используется достаточно общая модель описания сил сопротивления Q в таких устройствах:

$Q = b \cdot |V|^\alpha \cdot \text{sign}V$, где b и α —характеристики устройства;

V – скорость деформации.

При $\alpha=1$ получаем вязкое сопротивление, а b представляет собой коэффициент вязкого сопротивления; при $\alpha=0$ получаем сухое трение, а $b=Nf$, где N – сила нормального давления, а f – коэффициент трения; при $\alpha=2$ получаем турбулентное трение.

Большое число исследований сейсмоизоляции мостов привело к тому, что в развитых странах сейсмоизоляция стала основным способом обеспечения сейсмостойкости мостов. Однако этот вывод нельзя отнести к железнодорожным мостам. Ряд специфических особенностей их работы требует специальных решений для их сейсмозащиты. Эти особенности и примеры успешной реализации принципа сейсмоизоляции для железнодорожных мостов приведены в последующем разделе работы.

II.2. Методика расчета мостовых конструкций на сейсмические воздействия

Расчетная схема моста назначается в зависимости от его конструктивной схемы, типа применяемых опорных частей и уровня расчетных ускорений (рис. 2.9). Расчетную схему моста в поперечном направлении следует задавать в виде плоской рамы с шарнирным закреплением ригеля рамы к стойкам и упругим закреплением последних в основании (рис. 2.10).

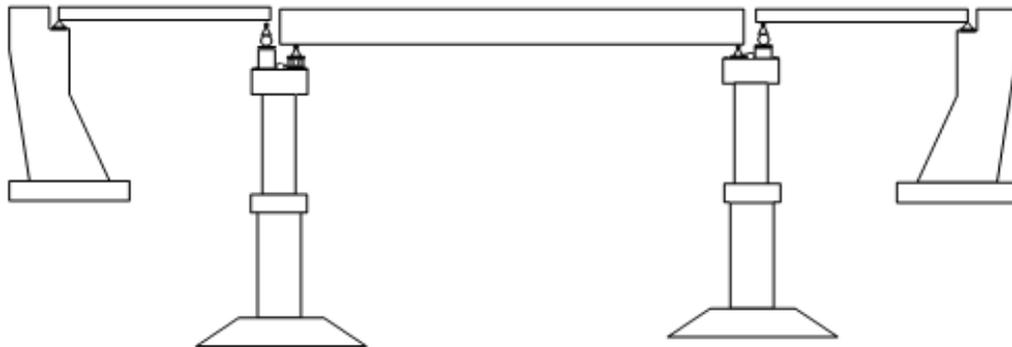
Расчетную схему моста в продольном направлении следует задавать либо в виде единой рамной системы, либо в виде отдельно стоящих моделирующих опоры консольных стержней (рис. 2.11) в зависимости от типа опорных частей и уровня сейсмической нагрузки:

1) при использовании РОЧ расчетная схема – рамная с упругим закреплением ригеля на стойках;

2) при использовании металлических опорных частей (тангенциальных, плоских, секторных, валковых и катковых) расчетную схему следует применять в соответствии с таблицей 2.1;

3) в тех случаях, когда возможны как рамная, так и стержневая консольная расчетная схема опоры следует выбирать наихудший вариант по величине сейсмических усилий и перемещений в элементах мостовых конструкций.

Рекомендации по выбору расчетной схемы в зависимости от типа опорных частей даны в таблице 2.1.



Рису. 2.9. Схема моста

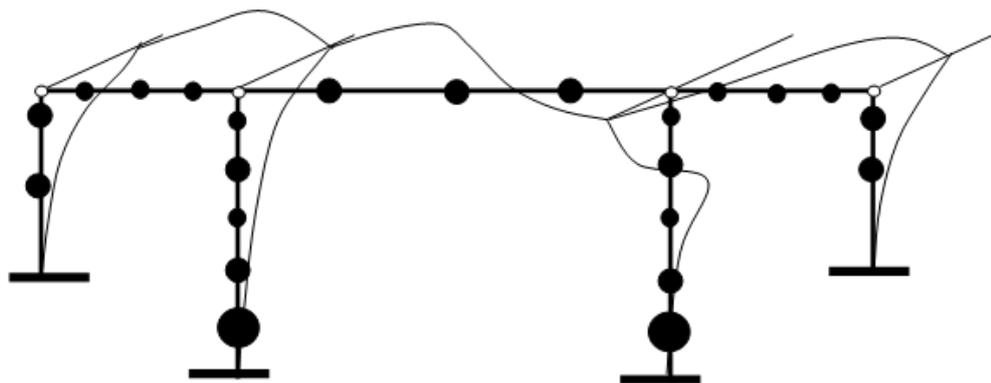


Рис. 2.10. Расчетная схема моста в поперечном направлении



Рис. 2.11. Расчетная схема для оценки продольных инерционных нагрузок на опоры моста в виде отдельно стоящих моделирующих опоры консольных стержней

Таблица 3.1

Тип опорных частей	ПЗ			МРЗ		
	Расчетная балльность			Расчетная балльность		
	7	8	9	7	8	9
	Уровень расчетных ускорений АК1 в долях g			Уровень расчетных ускорений А, в долях g		
	0,025	0,05	0,1	0,1	0,2	0,4
Катковые, валковые, секторные ($f < 0,005$)	рама	рама	рама/ консоль	рама/ консоль	консоль	консоль
Плоские, тангенциальные ($f > 0,3$)	рама	рама	рама	рама	рама/ консоль	консоль
Примечание: $A_{ПЗ} \approx 0,25 A_{МРЗ}$						

При выборе расчетной схемы моста на действие продольной горизонтальной нагрузки в случаях, допускающих как рамную так и консольную схемы следует рассматривать две схемы:

1) первая схема - мост рассматривается как единая рамная система, в которой силы трения в подвижных опорных частях и элементах верхнего строения пути не преодолеваются. По результатам расчета проверяются силы, действующие в подвижных опорных частях и элементах рельсового пути. Если эти силы превосходят силы трения, то применяется вторая расчетная схема;

2) вторая схема - опоры работают как отдельно стоящие консольные стержни. В этом случае в уровне низа опорных частей и рельсового пути к системе прикладываются соответствующие силы трения.

При наличии программных средств, позволяющих включить в расчетную схему демпферы сухого трения (далее - ДСТ), допускается моделировать подвижные опорные части с помощью ДСТ.

На стадии предварительных расчетов допускается заменять рамную расчетную схему, как вдоль, так и поперек оси моста отдельно стоящими консольными стержнями в случае, если жесткости опор различаются менее, чем на 30%. При этом в качестве сосредоточенных весов пролетных строений в расчетной схеме принимаются соответствующие опорные реакции. При

динамических расчетах фундаментов с плоской подошвой грунт моделируется пружиной с демпфером (рис. 2.12). Пружина учитывает упругие свойства основания, а демпфер - инерционные свойства основания.

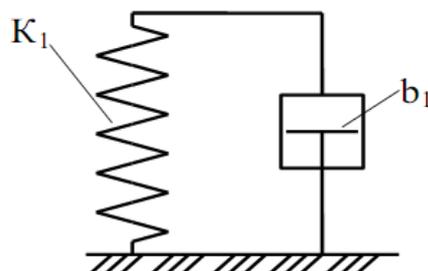


Рис. 2.12. Расчетная схема грунтового основания

Для фундаментов с плоской подошвой, опирающихся на скальное или полускальное основание, параметры жесткости K_1 и демпфирования b_1 в расчетной схеме (рис. 2.12) следует определять в соответствии с таблицей 3.2.

Таблица 3.2

Тип колебаний	Жесткость K_1	Коэффициент вязкого демпфирования b_1
Вертикальные	$\frac{4Gr}{1-\nu}$	$\frac{4F\rho V_2}{\gamma_2(1-\nu)\pi}$
Горизонтальные	$\frac{8Gr}{2-\nu}$	$F\rho V_2$
Поворотные	$\frac{8}{9} \cdot \frac{G \cdot J(1,862 - 0,55 \alpha_0)}{r}$	$\frac{8}{9} \cdot J\rho V_2 \cdot 0,19 \alpha_0$

В таблице приняты следующие обозначения:

G – модуль сдвига полупространства, моделирующего основание;

r – радиус штампа равновеликого по площади фундаменту;

ρ – плотность материала полупространства;

V_2 – скорость волн сдвига в основании;

F – площадь подошвы фундамента;

ρ – плотность грунта основания;

ν – коэффициент Пуассона грунта основания;

J – момент инерции подошвы фундамента;

γ_2 – коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона скального основания и изменяющийся в пределах от 1,094 (при $\nu=0$) до 1,177 (при $\nu=0,3$);

ω_0 - безразмерная частота колебаний.

ω - преобладающая частота колебаний сейсмического воздействия, а при ее отсутствии частота основного тона колебаний сооружения.

Модели основания с большим числом степеней свободы следует использовать в случае сложных геологических условий на площадке строительства при наличии информации о геологическом строении грунтового массива на глубину более двух вертикальных размеров фундамента. При этом из неограниченного грунтового массива основания выделяется расчетная область вблизи фундамента. Ограниченная область основания разделяется на отдельные элементы различными численными методами. На границе ограниченной области ставят граничные условия, которые в той или иной степени учитывают динамические характеристики отброшенной части основания. При моделировании оснований следует избегать сплошной акустической границы. Необходимо учитывать, что акустическая граница не имеет статической жесткости. В связи с этим при отсутствии других закреплений не допускается пользоваться программным обеспечением, использующим процедуры обращения матриц жесткости или податливости системы, а также неуровнешенных воздействий на систему.

Для исключения негативных эффектов системы с акустической границей допускается закреплять ее упругими элементами малой жесткости, так, чтобы период основного тона такой системы был не менее чем в пять раз больше других периодов колебаний. Для протяженных областей рекомендуется по нижней границе области между грунтовыми элементами и элементами акустической границы устанавливать сплошной балочный или плитный элемент, исключая изгибную деформацию области в целом.

При рассмотрении колебаний систем с несколькими степенями

свободы нужно записать столько дифференциальных уравнений движения, сколько имеется независимых координат. Тогда нашей основной задачей явится построение общего решения такой системы дифференциальных уравнений.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_g(t) \quad (2.1)$$

В формуле (2.1) приведено известное динамическое уравнение [22]:

где M – матрица масс системы;

C – матрица демпфирования;

K – матрица жесткости;

U – вектор обобщенных перемещений;

$[M]\{1\}\ddot{u}_g(t)$ – вектор кинематических возмущений.

При этом матрица жесткости и матрица масс системы:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1i} & k_{j1} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2i} & k_{j2} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \dots & k_{ii} & k_{ij} & \dots & k_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{ni} & k_{nj} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad [M] = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & & \\ & m_2 & & & & & 0 \\ & & \ddots & & & & \\ & & & m_r & & & \\ 0 & & & & \ddots & & \\ & & & & & m_n & \\ & & & & & & m_n \end{bmatrix}$$

Предполагаем, что матрица демпфирования имеет следующий вид:

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 & & & & & & \\ & c_2 & & & & & 0 \\ & & \ddots & & & & \\ & & & c_r & & & \\ 0 & & & & \ddots & & \\ & & & & & c_n & \\ & & & & & & c_n \end{bmatrix}$$

Векторы перемещений, скорости и ускорений:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_r \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix} \quad \{\dot{U}\} = \begin{Bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_r \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{Bmatrix} \quad \{\ddot{U}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{U}_1 \\ \ddot{U}_2 \\ \vdots \\ \ddot{U}_r \\ \vdots \\ \ddot{U}_n \end{Bmatrix} \quad \{1\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix}$$

Здесь учтем, что для любых форм колебаний $\{\phi\}_m$ и $\{\phi\}_n$ ($m \neq n$) справедливы условия ортогональности собственных форм колебаний:

$$\begin{aligned} \{\phi_m\}^T [M] \{\phi_n\} &= 0 \\ \{\phi_m\}^T [K] \{\phi_n\} &= 0 \quad m \neq n \end{aligned} \quad (2.2)$$

Для $m = n$ получаем:

$$\begin{aligned} \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} &= M_n \\ \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} &= K_n \quad m = n \end{aligned} \quad (2.3)$$

Модальная матрица:

$$\begin{aligned} [\Phi] &= [\{\phi_1\} \{\phi_2\} \dots \{\phi_r\} \dots \{\phi_n\}] \\ &= \begin{bmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1r} & \dots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \dots & \phi_{2r} & \dots & \phi_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \dots & \phi_{nr} & \dots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Допустим, что существует такое линейное преобразование:

$$\{U\} = [\Phi] \{Y\} \quad (2.4)$$

Подставляя уравнение (2.4) в уравнение (2.1) получим:

$$[M][\Phi]\{\ddot{Y}\} + [C][\Phi]\{\dot{Y}\} + [K][\Phi]\{Y\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_g(t)$$

Умножая это уравнение слева на матрицу $[\Phi]^T$, получим:

$$[\Phi]^T [M][\Phi]\{\ddot{Y}\} + [\Phi]^T [C][\Phi]\{\dot{Y}\} + [\Phi]^T [K][\Phi]\{Y\} = -[\Phi]^T [M]\{1\}\ddot{u}_g(t)$$

Кинематические возмущения в правой части формируются с использованием перемещений и ускорений грунта строительной площадки. Реализация аналитического или численного решения уравнения (2.1) выполняется одним из трех методов, имеющих те или иные достоинства и особенности. Этими методами являются:

- решение в форме интеграла Дюамеля;
- решение с использованием аппроксимирующих функций;
- решение с помощью интегральных преобразований уравнений

движения. При использовании решения в виде интеграла Дюамеля сейсмическая нагрузка на массы определяется решением уравнения

$$S_{ik} = \frac{Q_k}{g} \eta_{ik} \ddot{u}_g(t) \quad (2.5)$$

где Q_k – сосредоточенные массы конструкции опоры;

η_{ik} – коэффициент формы колебаний;

g – ускорение свободного падения;

$\ddot{u}_g(t)$ – интеграл Дюамеля, находится по формуле:

$$W_i(t) = -\frac{2\pi}{T_i} \int_0^t \ddot{\Delta}(t) e^{-\zeta\omega(t-T)} \cdot \sin \omega(t-T) dt, \quad (2.6)$$

где T_i – период собственных колебаний по i -й форме;

ζ – коэффициент демпфирования;

$\ddot{\Delta}$ – ординаты ускорений землетрясения;

ω – угловая частота свободных колебаний.

Решение общего уравнения движения (2.6) с использованием аппроксимирующих функций распространено при численном интегрировании и позволяет также найти сейсмические усилия на массы опорных сооружений.

Первым этапом расчёта на динамические воздействия является модальный анализ конструкции. Он проводится по уравнению (2.4).

Свободные колебания системы зависят от ее конструктивных характеристик и начальных условий (смещений, скоростей, ускорений), которые соответствовали моменту снятия с системы внешнего воздействия. Поскольку начальные условия могут быть различными, то и свободные колебания одной и той же системы могут быть разными с изменяющейся во времени конфигурацией эпюры динамических прогибов.

Можно задаться такими начальными условиями колебаний, чтобы получить свободные колебания системы с неизменяющейся во времени

формой, определяемой соотношениями ее динамических прогибов в разных точках. Такие колебания называют собственными.

Название собственные связано с тем, что формы этих колебаний и соответствующие им частоты определяются собственными характеристиками системы - значением и распределением масс, жесткостей, видом опор. Каждая система с n степенями свободы имеет n собственных частот и соответствующих им форм колебаний. Числом степеней свободы системы называют число независимых координат (линейных и угловых), определяющих положение всех масс системы в пространстве в любой момент времени ее движения.

Рассмотрим пример определения частот и форм собственных колебаний упругой системы опор методом деформаций. В этом методе за расчетную принимают упругую систему с сосредоточенными массами. Если такую систему отклонить от положения равновесия, то она будет совершать свободные колебания. В таком случае на систему в точках сосредоточения масс будут действовать инерционные силы, которые направлены в сторону, противоположную ускорениям соответствующих масс.

Для многомассовой опоры число частот и соответствующих им форм свободных горизонтальных колебаний равно числу масс - числу степеней свободы. При этом массы считаются сосредоточенными в узлах.

Уравнения свободных колебаний многостепенной каркасной системы без демпфирования имеют вид:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (2.7)$$

Очевидно, что уравнения (24) можно легко распространить на линейные системы с большим числом степеней свободы. Можно принять, что колебания масс системы происходят по гармоническому закону:

$$\{U\} = \{\phi\} e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

Где вектор $\{\phi\}$ - вектор собственных форм колебаний:

$$\{\phi\} = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_r \\ \vdots \\ \phi_n \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Постановка уравнения (2.9) в уравнение (2.4) даст:

$$([K] - \omega^2 [M])\{\phi\} = \{0\} \quad (2.10)$$

Уравнение (2.10) имеет нетривиальное решение, $\{\phi\} \neq \{0\}$ если определитель, составленный из коэффициентов при неизвестных равнялся $\{\phi\}$ нулю, это приводит к уравнению n -той степени относительно ω^2 :

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (2.11)$$

В нашем случае расчет частот и собственных форм колебаний будет проводится с использованием программы MathCAD.

В конкретных условиях свободные колебания системы обычно быстро затухают, что связано с затратами энергии на преодоление различных внешних и внутренних сопротивлений.

Для каждой из собственных форм колебаний характерна своя скорость затухания. К концу процесса свободных колебаний сложные движения из нескольких собственных форм колебаний постепенно вырождаются в одну форму, отличающуюся наименьшей скоростью затухания.

Решением уравнения (2.11) получается в общем случае:

$$\begin{aligned}\omega_1^2 &< \omega_2^2 < \dots < \omega_r^2 < \dots < \omega_n^2 \\ \omega_1 &< \omega_2 < \dots < \omega_r < \dots < \omega_n \\ T_1 &> T_2 > \dots > T_r > \dots > T_n\end{aligned}$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

II.3. Методика расчета элементов сейсмоизоляции и сейсмогашения

Расчет мостов с сейсмоизолирующими опорными частями необходимо проводить по акселерограммам землетрясений с использованием паспортных данных применяемых сейсмоизолирующих и демпфирующих устройств.

Для нелинейных демпфирующих устройств допускается линеаризация диаграммы деформирования. При применении сферических опорных частей и вязких демпферов в инженерных расчетах допускается использовать модель с эквивалентным вязким демпфированием бэкв, в которой реактивное усилие в гидравлических устройствах F определяется по формуле:

$$F = -C \cdot V^\alpha \operatorname{sign} V \approx b_{\text{жвд}} \cdot V,$$

где V – скорость перемещения штока

$$b_{\text{жвд}} = \frac{2}{\pi} C U^{\alpha-1} \omega^{\alpha-1} 2^\alpha B\left(\frac{\alpha+2}{2}, \frac{\alpha+2}{2}\right)$$

здесь U – расчетный ход демпфера;

C, α - параметры, характеризующие демпфер;

ω – преобладающая частота колебаний;

B – бета-функция, которая выражается через Γ -функцию:

$$B\left(\frac{\alpha+2}{2}, \frac{\alpha+2}{2}\right) = \frac{\Gamma\left(1+\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1+\frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2+\alpha)} = \frac{\left(\Gamma\left(1+\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2}{(1+\alpha)\Gamma(1+\alpha)}$$

$$\Gamma(1+\alpha) = 1 + b_1\alpha + b_2\alpha^2 + \dots + b_8\alpha^8 + \varepsilon, \quad \varepsilon < 3 \cdot 10^{-7}$$

где $b_1 = -0,577191652$; $b_2 = 0,988205891$; $b_3 = -0,897056937$; $b_4 = 0,918206857$;

$b_5 = -0,756704078$; $b_6 = -0,482199394$; $b_7 = -0,193527818$; $b_8 = 0,035868343$

где $b_1 = -0,577191652$; $b_2 = 0,988205891$; $b_3 = -0,897056937$; $b_4 = 0,918206857$;

$b_5 = -0,756704078$; $b_6 = -0,482199394$; $b_7 = -0,193527818$; $b_8 = 0,035868343$

График зависимости В-функции от α приведен на рисунке 2.13.

При расчетах по акселерограммам и разложении движения по формам колебаний недемпфированной системы затухание в демпфирующих элементах следует принимать не более 25% от критического значения.

При расчете систем сейсмоизоляции по линейно-спектральной методике, величина демпфирования принимается не более 25% от критического значения. Допускается вести расчет сооружений с сейсмоизолирующими опорными частями, как слабодемпфированных, то есть принимать $K\psi=1,5$.

При гармоническом возмущении допускается подбирать параметры сейсмоизоляции путем минимизации смещений или ускорений по амплитудно-частотной характеристике.

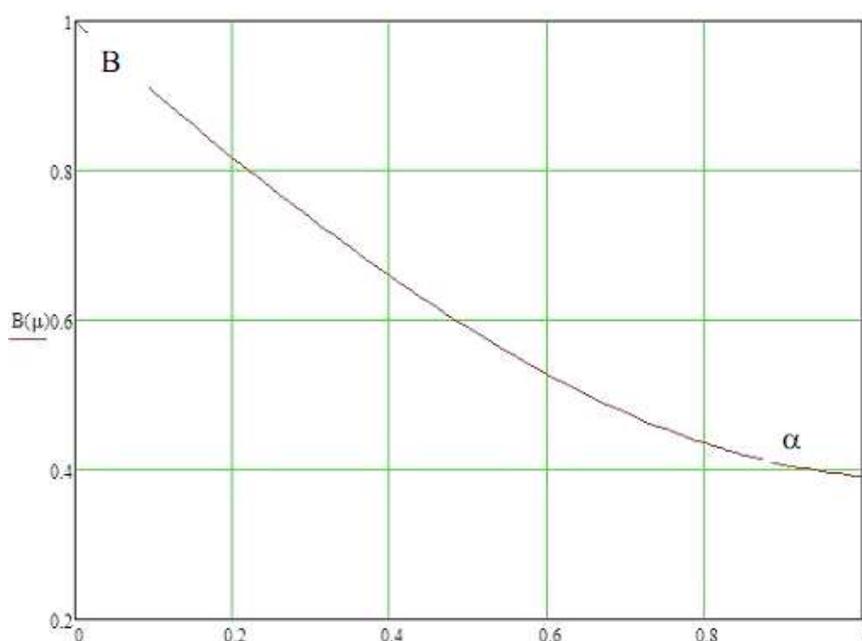


Рис.2.13. Зависимость В для определения эквивалентного вязкого трения

Жесткость сейсмоизолирующей опорной части для обеспечения режима гашения подбирается из условия:

$$C_{isol} = M_{span} \cdot k_2$$

Здесь

$$k_2 = k_0 \cdot f,$$

где: M_{span} – масса пролетного строения; k_g – парциальная частота колебаний гасителя; k_0 – частота основного тона колебаний опоры; коэффициент настройки f принимается по графику на рис. 2.14 (а) в зависимости от приведенной массы опоры ν .

Коэффициент неупругого сопротивления γ динамического гасителя колебаний (далее - ДГК), упруго связывающего опору и пролетное строение, определяется по графику, представленному на рис. 2.14 (б). Настройку ДГК, подобранную по графику на рис. 2.14 (а), рекомендуется уточнять с использованием варианта ЛСМ.

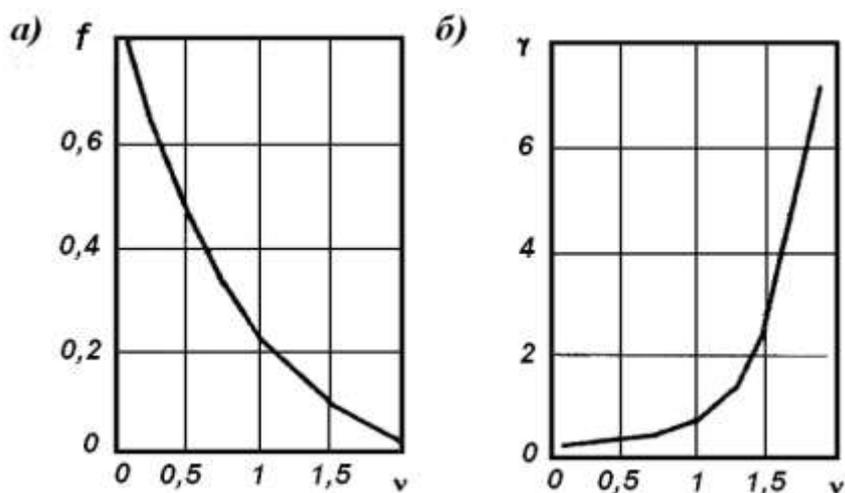


Рис.2.14. Зависимость настройки ДГК по частоте (а) и демпфированию (б) от его относительной массы ν

II.4. Выводы по главе

При возникновении землетрясений возникают:

- силы бокового давления грунтов на фундаменты и опоры моста;
- давление воды, вызванное сейсмическими воздействиями;
- нагрузки инерционные от собственного веса мостовых конструкций и

полезная от подвижного состава.

В главе разработана методика расчета мостов на сейсмические воздействия с применением антисейсмических демферов. В рамках защиты сооружений от сейсмических воздействий разработаны высокоэффективные гидравлические демпферы, позволяющие ограничить воздействующие усилия на заданном проектом расчетном уровне. Функцию демпфирования сейсмических воздействий выполняют эластомерные опорные части со свинцовыми сердечниками. Совершенно новыми в этом направлении являются Маугер-сферические маятниковые опорные части скольжения, предназначенные для сейсмоизоляции сооружений. В отличие от известных в этой области маятниковых опорных частей трения американского производства, опорные части с применением в них материала «MSM®» обладают очень низким трением и, как следствие, очень высокой степенью изоляции.

Задачей гидравлических демпферов является обеспечение практически беспрепятственных перемещений при медленных (температурных) перемещениях, блокирование перемещений при увеличении скорости перемещений (вследствие сейсмических толчков, ветра, резкого торможения и т. п.) до возникновения в демпфере заданной проектом расчетной ответной реакции, а при ее превышении — перемещение, при котором происходит поглощение энергии воздействия за счет ее преобразования в тепловую энергию.

Приведена методика расчета мостовых конструкций на сейсмические воздействия и методика расчета элементов сейсмоизоляции и сейсмогашения.

III. РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА К ИССЛЕДОВАНИЮ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МОСТОВ

III.1. Расчет моста с достаточно большой собственной массой

В случае использования неразрезных пролетных строений с большой собственной массой сейсмическая нагрузка от массы пролетного строения, передаваемая на опору, делает ее конструкцию уязвимой при землетрясениях.

При расчетной сейсмичности 9 баллов фундамент опоры следует закладывать на скальном грунте или уменьшать сейсмическую нагрузку на опору за счет изменения системы моста, конструкции опор и пролетного строения или применения специальных антисейсмических устройств.

Рассмотрим схему передачи сейсмической нагрузки на устои, опирающиеся на скальное основание. В средней части моста установлено неразрезное пролетное строение, в боковых частях разрезные балки (рис. 3.1). Две промежуточные опоры в средней части моста высотой 27,2 и 31,7 м выполнены гибкими выше обреза фундаментов. На этих опорах установлены неподвижные опорные части. На остальных опорах, включая устои, опорные части допускают перемещение балок относительно опор.

Пролетные строения объединены в две цепочки с помощью соединительных элементов. Длинная цепочка, включающая неразрезное пролетное строение и разрезную балку, присоединена к устою на скальном основании с повышенными размерами, обеспечивающими устойчивость против сдвига и опрокидывания. Устой на противоположной стороне долины имеет меньшие размеры, поскольку воспринимает сейсмическую нагрузку только от двух разрезных пролетных строений.

Поскольку устои имеют значительную жесткость в горизонтальном направлении, сила инерции от масс пролетных строений практически полностью передается на устои, что позволяет облегчить промежуточные опоры. Недостаток этой схемы состоит в том, что масса пролетных строений присоединена к устоям расположенным в верхних частях бортов долины, где

интенсивность колебаний грунта возрастает, что должно быть учтено при определении сейсмической нагрузки. Для того, чтобы уменьшить сейсмические воздействия на устои будем использовать амортизирующие демпферы с двух сторон. В таблице 3.1 даны необходимые данные для проведения сейсмического расчета. При этом получены три частоты собственных колебаний моста - $\omega_1 = 4$ рад/сек, $\omega_2 = 11$ рад/сек, $\omega_3 = 16$ рад/сек

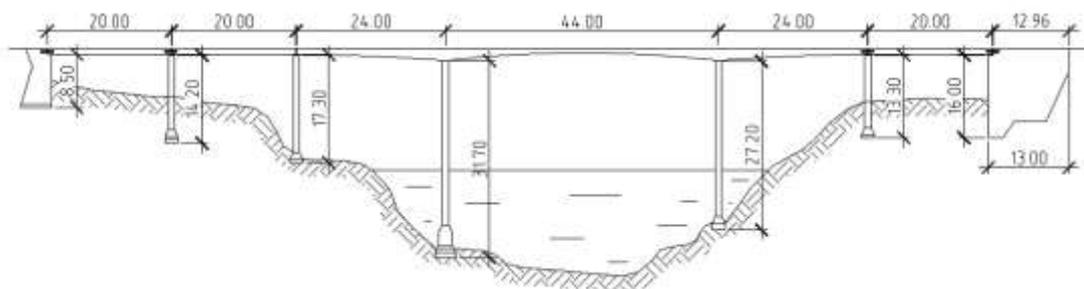


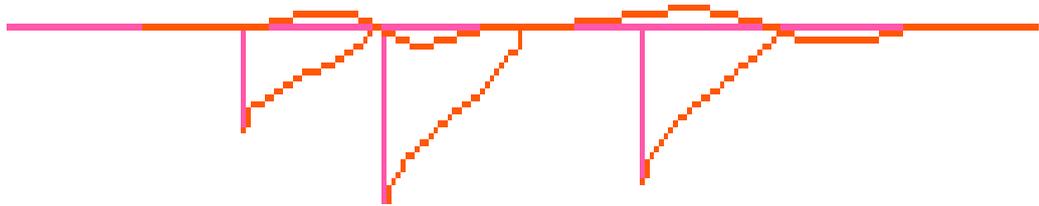
Рис. .3. 1. Схема моста с передачей сейсмической нагрузки на устои

Таблица 3.1

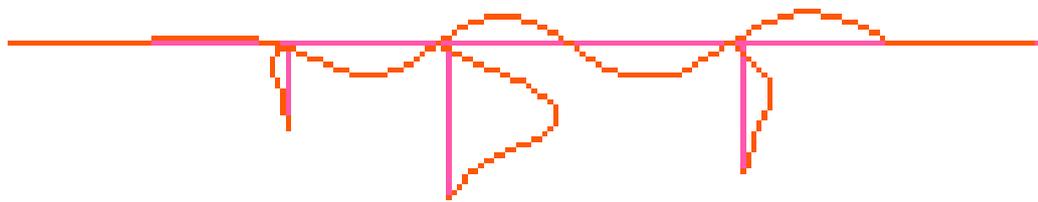
Наименование	Величина		
	Нормативное значение, кН	Коэффициент надежности, γ_f	Расчетное значение, кН
Асфальтобетон 0,07*11,16*7,5*23	135	1,5	202
Защитный слой 0,03*11,16*7,5*25	63	1,3	82
Гидроизоляция 0,02*11,16*7,5*15	25	1,3	33
Выравнивающий слой 0,03*11,16*7,5*21	53	1,3	69
Перильные ограждения 7,5*2*2,5	38	1,1	41
Барьерное ограждение 7,5*2*2	30	1,1	33
Собственный вес балок:			
- средних 136*4/2	272	1,1	299
- крайних 147*2/2	147	1,1	162

Вес продольного шва омоноличивания 0,15*0,63*5*25*7,5	89	1.1	98
Итого: постоянный вес от пролетного строения		852	1019

а)



б)



в)

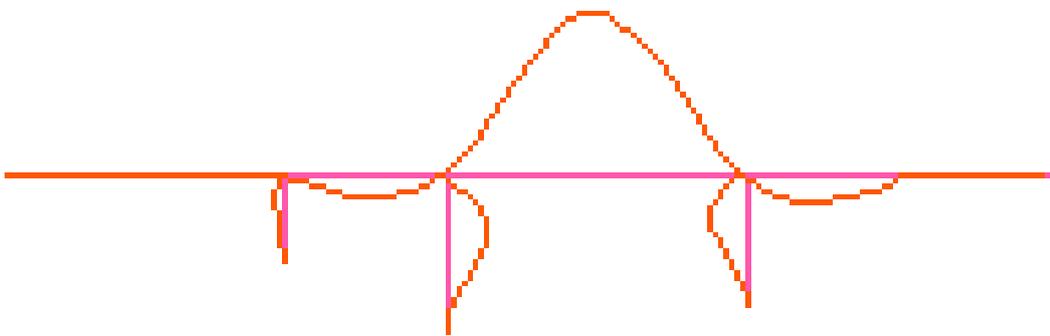


Рис.3.2. Три формы собственных колебаний моста: а) 1-я форма, б) 2- форма, в) 3-я форма

В таблице 3.2 приведены полученные из расчета сейсмические усилия для каждой точки расчетной схемы для заданного моста. Расчеты показали, что применение антисейсмического демпфера позволила уменьшить сейсмическую нагрузку на устои моста. На рис. 3.3-3.5 приведены

полученные из расчета эпюры внутренних усилий в конструктивных элементах моста.

Таблица 3.2

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

: Номер : массы : i :	: Номер формы : колебания : k :	: коэффициент : сейсмичности: : Kc*ВЕТ :	: Обобщенная масса: : СУММА : Q(i)X^2(i) :	: Масса : СУММА : Q(i)X(i) :	: Коэффициент: : формы : п(i,k) :	: Сейсмическая: : сила : S(i,k)
: 1 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349797 :	: 0.022980
: 2 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.000000 :	: 0.000000
: 3 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349797 :	: 0.000000
: 4 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.000000 :	: 0.000000
: 5 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.000000 :	: 0.000000
: 6 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349797 :	: 0.000000
: 7 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.000000 :	: 0.000000
: 8 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.000000 :	: 0.000000
: 9 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349797 :	: 0.000000
: 10 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.000000 :	: 0.000000
: 11 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: -0.000000 :	: -0.000000
: 12 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349797 :	: 0.000000
: 13 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.000000 :	: 0.000000
: 14 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: -0.000000 :	: -0.000000
: 15 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349542 :	: 0.000000
: 16 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: -0.000000 :	: -0.000000
: 17 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.023046 :	: 0.000133
: 18 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349542 :	: 0.000000
: 19 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.088454 :	: 0.002502
: 20 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.020244 :	: 0.000573
: 21 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349542 :	: 0.000000
: 22 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.154540 :	: 0.000890
: 23 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.011876 :	: 0.000068
: 24 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349542 :	: 0.000000
: 25 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.176168 :	: 0.004984
: 26 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: -0.001961 :	: -0.000055
: 27 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349542 :	: 0.000000
: 28 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.131711 :	: 0.000763
: 29 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: -0.021141 :	: -0.000123
: 30 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349287 :	: 0.000000
: 31 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 0.000087 :	: 0.000002
: 32 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: -0.045529 :	: -0.001288
: 33 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349542 :	: 0.000000
: 34 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: -0.124434 :	: -0.000734
: 35 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: -0.018071 :	: -0.000107
: 36 :	: 1 :	: 0.36400:	: 0.339383 :	: 8.6662:	: 1.349542 :	: 0.000000

: 37 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.155280 :	-0.004393
: 38 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.001293 :	0.000037
: 39 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.349797 :	0.000000
: 40 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.125046 :	-0.000745
: 41 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.012446 :	0.000074
: 42 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.349797 :	0.000000
: 43 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.066800 :	-0.001890
: 44 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.015278 :	0.000432
: 45 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.349797 :	0.000000
: 46 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.014024 :	-0.000084
: 47 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.009714 :	0.000058
: 48 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350053 :	0.000000
: 49 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.000348 :	-0.000010
: 50 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.004282 :	-0.000121
: 51 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350053 :	0.000000
: 52 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.003355 :	-0.000020
: 53 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.002449 :	0.000015
: 54 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350308 :	0.000000
: 55 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.016611 :	0.000470
: 56 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.007206 :	0.000204
: 57 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350308 :	0.000000
: 58 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.051658 :	0.000328
: 59 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.009992 :	0.000063
: 60 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350308 :	0.000000
: 61 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.093970 :	0.002658
: 62 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.010837 :	0.000307
: 63 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350563 :	0.000000
: 64 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.135848 :	0.000904
: 65 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.009798 :	0.000065
: 66 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350563 :	0.000000
: 67 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.169963 :	0.004808
: 68 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.006966 :	0.000197
: 69 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350563 :	0.000000
: 70 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.189344 :	0.001261
: 71 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.002460 :	0.000016
: 72 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350563 :	0.000000
: 73 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.190340 :	0.005384
: 74 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.001933 :	-0.000055
: 75 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350819 :	0.000000
: 76 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.158881 :	0.001120
: 77 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.010998 :	-0.000078
: 78 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350819 :	0.000000
: 79 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.097954 :	0.002771
: 80 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.019665 :	-0.000556
: 81 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350819 :	0.000000

: 82 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.000048 :	0.000000
: 83 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.029468 :	-0.000222
: 84 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350819 :	0.000000
: 85 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.090599 :	-0.001542
: 86 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.016212 :	-0.000276
: 87 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.350819 :	0.000000
: 88 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.132605 :	-0.001024
: 89 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.005161 :	-0.000040
: 90 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351074 :	0.000000
: 91 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.134954 :	-0.000777
: 92 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.003595 :	0.000021
: 93 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351074 :	0.000000
: 94 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.107044 :	-0.000894
: 95 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.009951 :	0.000083
: 96 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351074 :	0.000000
: 97 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.058680 :	-0.000338
: 98 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.013807 :	0.000080
: 99 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351074 :	0.000000
: 100 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.015099 :	0.000134
: 101 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.000000 :	-0.000000
: 102 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351074 :	0.000000
: 103 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.000000 :	-0.000000
: 104 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.000000 :	-0.000000
: 105 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351074 :	0.000000
: 106 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.000000 :	-0.000000
: 107 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.000000 :	-0.000000
: 108 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351329 :	0.000000
: 109 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.000000 :	-0.000000
: 110 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.000000 :	0.000000
: 111 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351329 :	0.000000
: 112 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.000000 :	-0.000000
: 113 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.000000 :	0.000000
: 114 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	1.351329 :	0.000000
: 115 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.000000 :	0.000000
: 116 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.081483 :	0.000472
: 117 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.000015 :	0.000000
: 118 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.051377 :	-0.000592
: 119 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.290592 :	0.003346
: 120 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.000029 :	0.000000
: 121 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.085058 :	-0.000502
: 122 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.574289 :	0.003387
: 123 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.000044 :	0.000000
: 124 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	-0.101120 :	-0.001324
: 125 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.879692 :	0.011516
: 126 :	1 :	0.36400:	0.339383 :	8.6662:	0.000058 :	0.000000

: 127	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.099715	:	-0.000594
: 128	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	1.155218	:	0.006887
: 129	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.000073	:	0.000000
: 130	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.081075	:	-0.001186
: 131	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.059651	:	0.000873
: 132	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.000044	:	0.000000
: 133	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.028395	:	-0.000169
: 134	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.215646	:	0.001286
: 135	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.000087	:	0.000000
: 136	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.048185	:	-0.000842
: 137	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.433845	:	0.007581
: 138	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.000131	:	0.000000
: 139	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.059497	:	-0.000357
: 140	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.680772	:	0.004082
: 141	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.000174	:	0.000000
: 142	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.062587	:	-0.001466
: 143	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.924123	:	0.021643
: 144	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.000218	:	0.000000
: 145	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.057889	:	-0.000367
: 146	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	1.134279	:	0.007195
: 147	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.000261	:	0.000000
: 148	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.046040	:	-0.000753
: 149	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	1.284171	:	0.021006
: 150	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.000305	:	0.000000
: 151	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.027859	:	-0.000185
: 152	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.067388	:	0.000449
: 153	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.000007	:	0.000000
: 154	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.031996	:	-0.000176
: 155	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.242611	:	0.001334
: 156	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.000014	:	0.000000
: 157	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.053931	:	-0.000359
: 158	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.485682	:	0.003233
: 159	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.000022	:	0.000000
: 160	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.065907	:	-0.000383
: 161	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.757122	:	0.004399
: 162	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.000029	:	0.000000
: 163	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.068230	:	-0.000481
: 164	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	1.019115	:	0.007186
: 165	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.000036	:	0.000000
: 166	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.061361	:	-0.000356
: 167	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	1.236420	:	0.007178
: 168	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	0.000043	:	0.000000
: 169	:	1	:	0.36400:	0.339383	:	8.6662:	-0.046015	:	-0.000347

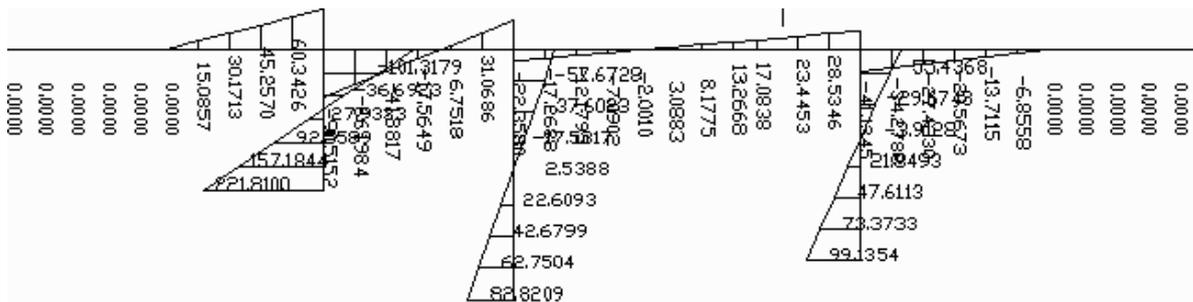


Рис. 3.3. Эпюры моментов, МПа·м

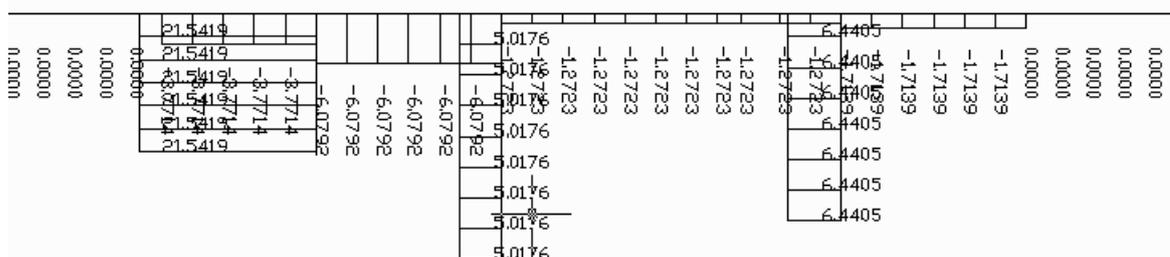


Рис. 3.4. Эпюры поперечных сил, МПа

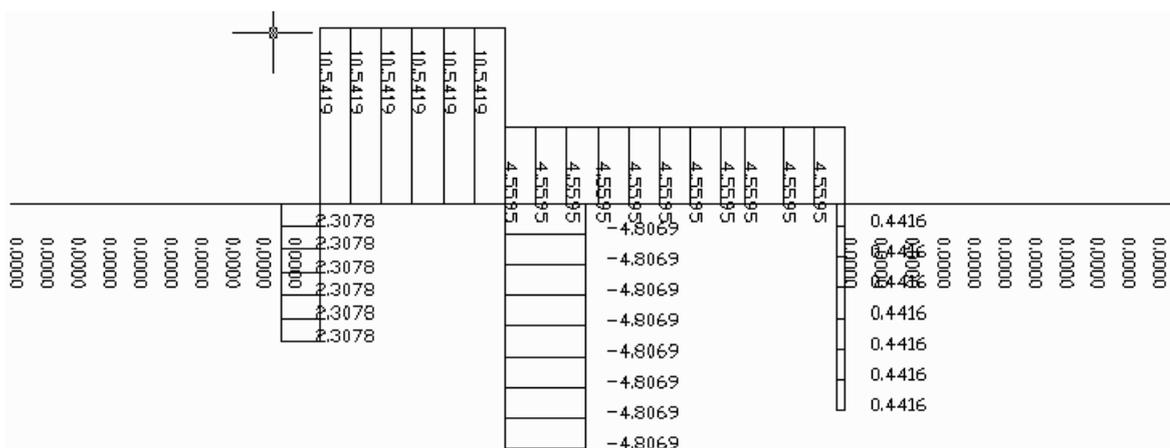
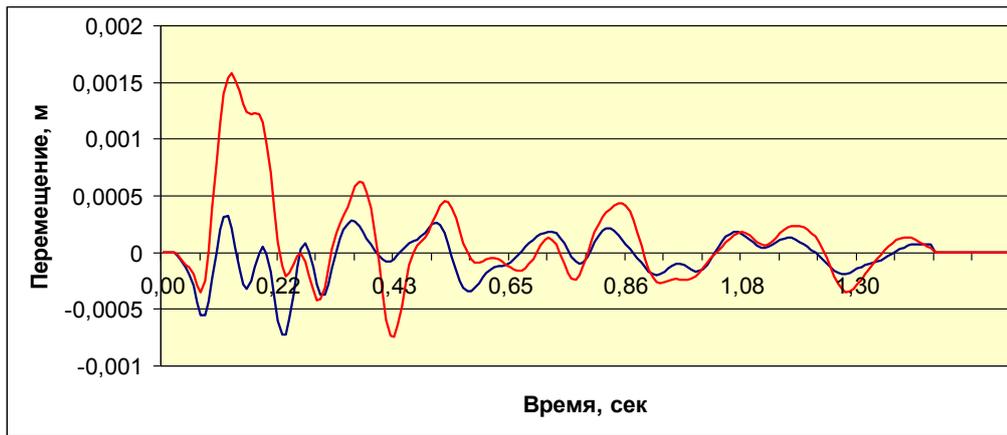


Рис. 3.5. Эпюры продольных сил, МПа

На рис.3.6 приведены графики максимальных перемещений пролетных строений в трех точках соединения с опорой. Из рисунков видно, что в середине моста преобладают максимальные перемещения, как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Однако, горизонтальные перемещения больше чем вертикальные.

а)



б)



в)

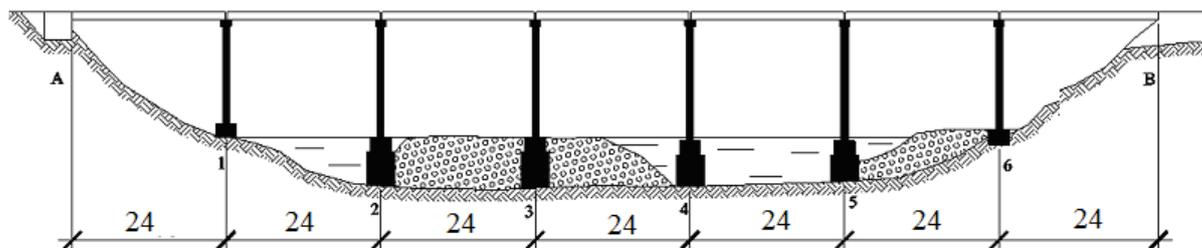


Рис.3.6. Амплитуда перемещений во времени: а) точка в середине моста, б) точка в левом краю моста, в) точка в правом краю моста г) точка 4 (красная линия горизонтальные перемещения, синяя линия вертикальные перемещения)

III.2, Расчет железобетонных опор балочного разрезного моста

Проведем сейсмический расчет опоры железобетонных опор балочного моста. Настоящий мост располагается на автомобильной дороге общего пользования I категории (рис.3.7).

а)



б)

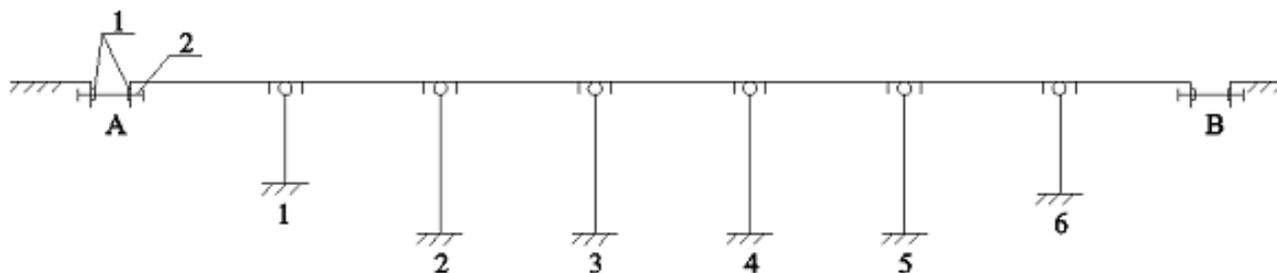


Рис. 3.7. Мост через судоходную реку:

а) схема моста; б) схема передачи сейсмической нагрузки на опоры

Для повышения сейсмостойкости и уменьшения стоимости мостов с неразрезными пролетными строениями продольно-неподвижные опорные части могут быть установлены на двух и более гибких опорах, конструкция которых должна быть рассчитана на усилия, возникающие в рамно-неразрезной системе при изменении длины пролетного строения от температурного воздействия воздушной среды. Когда промежуточные опоры достаточно гибкие и не испытывают больших напряжений от температурных деформаций пролетного строения, применяют конструкцию по типу, показанному на рис. 3.7. Температурно-неразрезные пролетные строения состоят из сборных балок и монолитной плиты. Продольная к оси

моста сейсмическая нагрузка воспринимается гибкими промежуточными опорами №1–6. Для ограничения сейсмической нагрузки на опоры №№1–6 используются устои. С этой целью между устоями и концами пролетных строений установлены буферные прокладки и стяжки.

Стойчатая опора устроена на фундамента заложенных в устойчивых грунтах и предназначена на $l_1=l_2=\dots l_7=24$ – метровые пролетные строения по 8 балок в каждом из трех пролетов (рис.3.8).

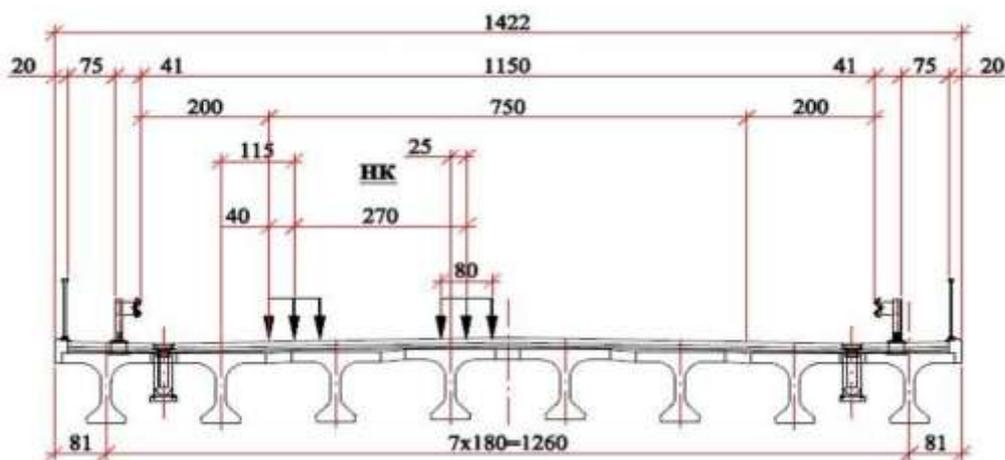


Рис.3.8. Разрез пролетного строения путепровода

Пролетное строение моста выполнено из 8 предварительно напряженных балок таврового сечения высотой $h=1,20$ м. Конструктивная схема пролетного строения разрезная бездиафрагменная, они объединены в общую монолитную плиту пролетного строения.

Объединение балок пролетного строения производится омоноличиванием в петлевого стыка, который соединяет полки примыкающих балок вдоль всего пролета. Для этого промежуточные балки имеют выпуски арматуры с двух сторон на боковых поверхностях свесов верхней полки. Крайние балки имеют выпуски с одной стороны для связи с промежуточными балками. На крайних балках пролетного строения располагаются тротуарные блоки с бордюром. Крепление тротуарных блоков к балкам производят с помощью сварки закладных деталей. До проведения расчета на сейсмостойкость вычислим предварительные геометрические и

физические характеристики исследуемого объекта. В табл.4.3 приведены вычисленные значения нагрузок от собственного веса дорожной одежды на 1 м² поверхности пролетного строения.

Таблица 4.3

Расчет нагрузок от собственного веса дорожной одежды

Слой дорожной одежды	Толщина, см	Объемный вес, тс/м ³	Нормативное значение нагрузки, тс/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетное значение нагрузки, тс/м ²
Асфальтобетонное покрытие	7	2,3	0,161	1,5	0,242
Защитный слой бетона	4	2,35	0,094	1,3	0,122
Гидроизоляция	1	1,5	0,015	1,3	0,020
Выравнивающий слой бетона	3	2,35	0,071	1,3	0,092
Итого			0,341		0,475

Предполагается, что мост при землетрясении перемещается в продольном направлении. Общее сопротивление продольному перемещению оказывают опорные части на устоях и промежуточных опорах, создающие силы трения, пропорциональные скорости, и промежуточные опоры, реакции которых считаются упругими. Предполагается, что величины исходных зазоров достаточны, чтобы не происходили соударения соседних пролетных строений, т.е. коэффициенты зазора = 1.

При этом на единицу длины раны:

собственный вес ригеля - 28 кН/м,

собственный вес отдельной столбчатой опоры - 10 кН/м,

собственный вес отдельной балки - 13,9 кН/м,

Момент инерции опоры 1 - 6 при изгибе - $I = 0,02133 \text{ м}^4$,

Модуль упругости материала опоры - 33000 МПа,

Высота опоры 1 и 2 с учетом ригеля – $H = 8,5 \text{ м}$,

Пролетное строение длиной - 24 м,

Площадь поперечного сечения одного столба – $0,4 \text{ м}^2$.

Плотность материала – 25 кН/м²,

Коэффициент демпфирования в буферном устройстве – $c=0,05$,

Выделим в конструкции систему:

1) Промежуточная опора и пролетное строение 24 м,

Тогда жёсткость эквивалентной опоры определяется изгибной жёсткостью реальной промежуточной опоры 1.

$$k = \frac{12EI}{H^3} = \frac{12 \cdot 30000 \cdot 10^3 \cdot 0,02133}{8,5^3} = 12503,64 \text{ кН/м}$$

Приведенная масса в конце опоры будет

$$M = M1 + M2 + M3 = 67,2 + 222,4 + 42,5 = 332,1 \text{ кН}$$

Круговая частота без учёта демпфирования

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}} = \sqrt{\frac{12503,64}{332,1}} = 6,14 \text{ рад/сек}$$

Собственная частота

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 0,977 \text{ Гц}$$

Период собственных колебаний

$$T = \frac{1}{f} = 1,0235 \text{ сек}$$

Круговая частота колебаний с учётом демпфирования

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - c^2} = 6,16 \sqrt{1 - 0,05^2} = 6,13 \text{ рад/сек}$$

Период колебаний с учётом значений демпфирования буферов составляет

$$T = \frac{2\pi}{\omega_d} = 1,025 \text{ сек}$$

На рис. 3.9 приведены график изменения перемещений во времени для промежуточной опоры 1 и 4. Из графиков видно, что преобладают максимальные горизонтальные перемещения. Из-за существования демпферных устройств, происходят затухание колебаний на вершинах опор.

а)



б)



Рис.3.9 Амплитуда перемещений средней и крайней промежуточных опор во времени: а) точка в средней опоре, б) точка в крайней опоре (красная линия горизонтальные перемещения, синяя линия вертикальные перемещения)

III.3. Расчет оценки параметров сейсмозащитных устройств

К числу параметров сейсмозащитных устройств относятся упругодемпфирующие характеристики опорных частей. Вопросы назначения жесткости и размеров столика опорной части детально исследованы в работах И.О.Кузнецовой и Ван Хайбиня. Фрикционно-подвижные болтовые соединения (ФПС) воспринимают горизонтальные нагрузки. Они представляют собой болтовое соединение на высокопрочных болтах с овальными отверстиями, допускающими подвижки в соединении при

экстремальных нагрузках. Здесь происходит проскальзывание во фрикционном соединении столика с пролетным строением. Основной элемент уровня защиты – болтовое фрикционно-подвижное соединения. Общие схемы этих соединений показаны на рис. 3.10. ФПС отличается от обычного болтового соединения овальными отверстиями под болты и специальным покрытием соединяемых стальных листов, обеспечивающим плавность процесса скольжения. Теория по расчету ФПС представлена в работе [32].

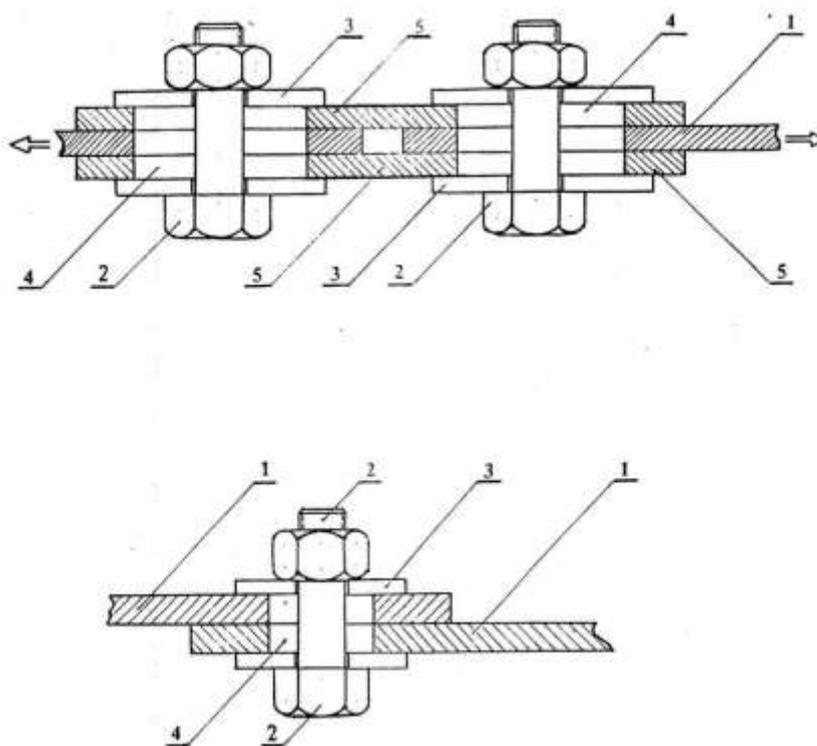


Рис.3.10. Общие схемы ФПС стыкового(а) и нахлесточного (б)

1 – соединяемые листы; 2 – высокопрочный болт; 3 –шайба; 4 – овальное отверстие; 5 – соединительная прокладка

Принципиальная схема установки сейсмозащитных устройств, необходимая для дальнейшего анализа пролетного строения приведена на рис.3.11 (а, б), на котором показаны схемы двух эстакад: трехпролетные и четырехпролетные. Эти эстакады выполнены из сталежелезобетонных

конструкций. На рисунке выделены фрагменты линии с опорами 32-35 (рис.3.11, а) и 54-58 (рис.3.11, б). Для всех эстакад характерно наличие одной неподвижно-податливой опорной части предлагаемого типа, на которую передается вся продольная нагрузка.

Остальные опорные части выполнены продольно-подвижными. Для снижения смещений и усилий на опоры в системе опирания предусматривается как минимум один вязкий демпфер.

Например, на рис.3.11, а нагрузка пролетного строения передается на опору №32 через упругую связь (1), которая выполнена в виде гибкого столика. Для предотвращения перегрузки опоры при 8 и 9-балльных воздействиях упругая связь соединена с опорой и пролетным строением с помощью ФПС (2). Демпфирующие устройства (3), устанавливаются на опоре 35.

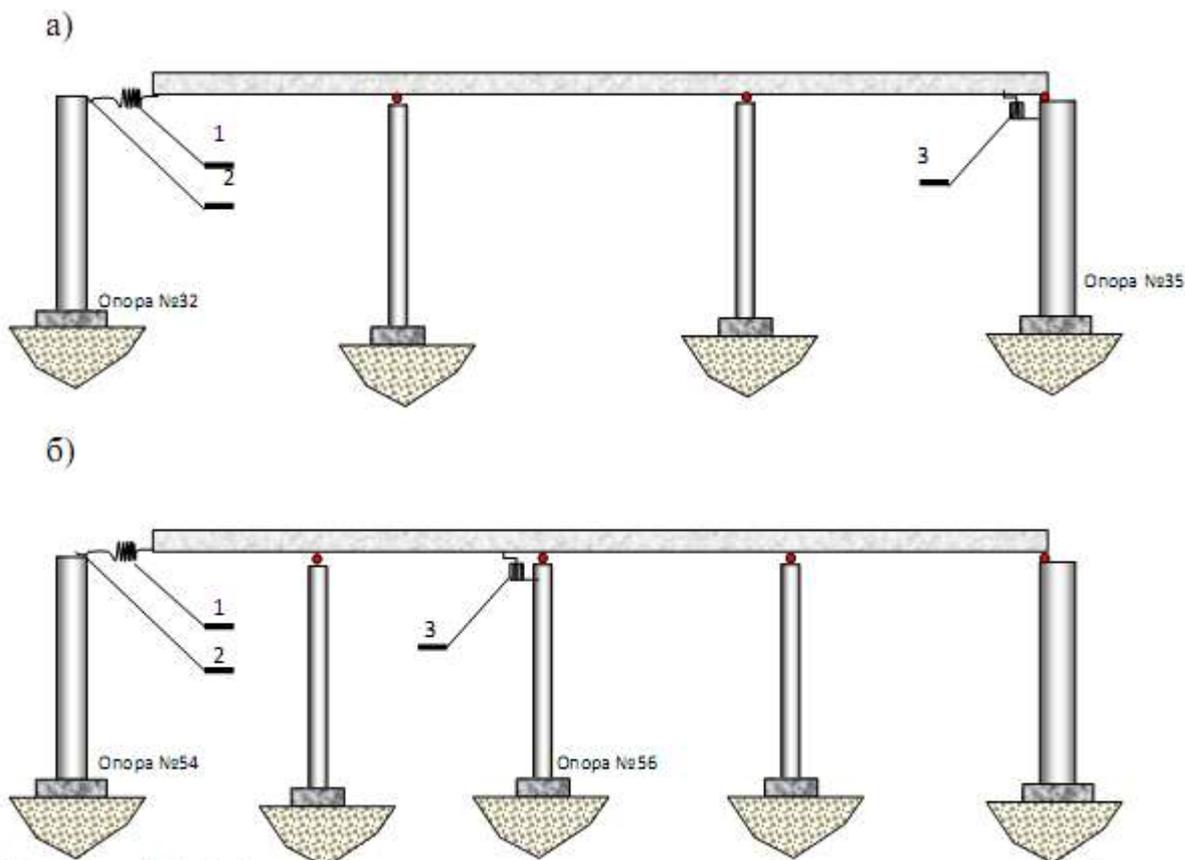


Рис. 3.11. Принципиальная схема установки сейсмозащитных устройств

1 – упругий элемент (гибкий столик); 2 – ФПС; 3 - демпфер

а) трехпролетный мост б) четырехпролетный мост

Не трудно видеть, что независимо от количества пролетов при продольных колебаниях включаются в работу всего две опоры: опора с неподвижной упругой опорной частью и опора с демпфером. Остальные опоры взаимодействуют с пролетным строением силой трения в подвижных опорных частях. Этим трением в запас прочности можно пренебречь при расчете сейсмозащитных устройств. С учетом сказанного расчетная схема для качественного анализа эффективности принятой системы защиты и подбора параметров сейсмозащитных устройств, приведена на рис.3.12.

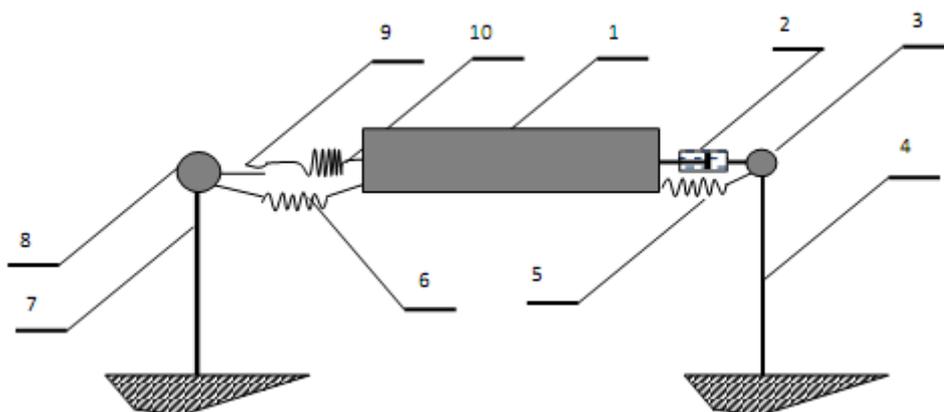


Рис. 3.12. Расчетная схема для качественного анализа эффективности принятой системы защиты 1 – масса пролетного строения M_{span} ; 2 - вязкий демпфер с коэффициентом вязкого демпфирования b ; 3 –масса правой опоры M_{right} ; 4 –жесткость правой опоры ; 5 –вспомогательная жесткость $C_{right} = 200$ кН/м; 6 – вспомогательная жесткость $C_{left} = 145$ кН/м; 7 – жесткость левой опоры ; 8 –масса левой опоры M_{left} ; 9 – ФПС; 10 – упругий элемент

Схема включает 9 элементов. Массы опор приведены к их верху, исходя из сохранения их жесткости и периода колебаний. При этом величины масс составили:

$$M_{left} = 998.132 \text{ т} ; M_{right} = 809.063 \text{ т}.$$

Для проведения расчетов приняты следующие исходные данные:

- податливость опоры №32 $\delta = 9.26551 \cdot 10^{-7}$ кН/м;
- период основного тона опоры №54 $T = 0.191077$ с;

- податливость опоры №35 $\delta=1.686217 \cdot 10^{-6}$ кН/м;
- период основного тона опоры №35 $T=0.2320747$ с;
- масса пролетного строения $M_{span}=2396$ т;
- жесткость сейсмоизолирующего элемента $C=130000$ кН/м.

Коэффициент вязкого демпфирования принят для выбранных демпферов равным $2 \cdot 789=1578$ кН/м. В расчетную схему дополнительно введены два упругих элемента, объединяющие систему в момент проскальзывание ФПС.

Жесткость элементов принята малой, и они введены для того, чтобы в процессе вычислений матрица жесткости не становилась особенной. Жесткости элементов приняты равными $C_{left}=200$ кН/м; $C_{right}=145$ кН/м. С одной стороны эти жесткости не влияют на колебания системы. Период основного тона колебаний системы при открытых демпферах составляет при принятых жесткостях около 12 секунд.

С другой стороны у них есть физический смысл. Так, принятое значение C_{left} соответствует паспортным данным жесткости демпфера при низких частотах. Коэффициенты неупругого сопротивления в введенных упругих элементах приняты равными 0.1.

Рассматриваемая система имеет три степени свободы. Матрица инерции (масс) системы имеет вид:

$$M=[M_{span}, M_{left}, M_{right}] = [2396, 998.132, 809.063]$$

В зависимости от того, моделирующий ФПС, система может находиться в одном из двух состояний. В обоих состояниях имеет место вязкое демпфирование в демпфере на правой опоре. Оба состояния характеризуются матрицей вязкого демпфирования.

$$\mathbf{B}_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b \\ 0 & -b & b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1580 \\ 0 & -1580 & 1580 \end{bmatrix}$$

В начальном состоянии система характеризуется следующими матрицами жесткости и гистерезисного демпфирования :

$$C^{(1)} = \begin{pmatrix} C_{left} + C_{right} + C_{fd} & -C_{left} - C_{fd} & -C_{right} \\ -C_{left} - C_{fd} & C_{left} + C_{pierL} + C_{fd} & 0 \\ -C_{right} & 0 & C_{right} + C_{pierR} \end{pmatrix}$$

$$B_n^{(1)} = \begin{pmatrix} C_{left} \cdot \gamma_{left} + C_{right} \cdot \gamma_{right} + C_{fd} \cdot \gamma_{fd} & -C_{left} \cdot \gamma_{left} - C_{fd} \cdot \gamma_{fd} & -C_{right} \cdot \gamma_{right} \\ -C_{left} \cdot \gamma_{left} - C_{fd} \cdot \gamma_{fd} & C_{left} \cdot \gamma_{left} + C_{pierL} \cdot \gamma_{pier} + C_{fd} \cdot \gamma_{fd} & 0 \\ -C_{right} \cdot \gamma_{right} & 0 & C_{right} \cdot \gamma_{right} + C_{pierR} \cdot \gamma_{pier} \end{pmatrix}$$

Анализ спектральных характеристик (частот и форм колебаний, а также спектра демпфирования) выполнен с использованием программного обеспечения MathCad-14. Периоды колебаний и частоты при закрытом ФПС составили:

$$T = [0.903; 0.18; 0.232]; \quad K = [6.955; 34.901; 27.077]$$

При открытом ФПС система характеризуется следующими матрицами жесткости и гистерезисного демпфирования :

$$C^{(0)} = \begin{pmatrix} C_{left} + C_{right} & -C_{left} & -C_{right} \\ -C_{left} & C_{left} + C_{pierL} & 0 \\ -C_{right} & 0 & C_{right} + C_{pierR} \end{pmatrix}$$

$$B_n^{(0)} = \begin{pmatrix} C_{left} \cdot \gamma_{left} + C_{right} \cdot \gamma_{right} & -C_{left} \cdot \gamma_{left} & -C_{right} \cdot \gamma_{right} \\ -C_{left} \cdot \gamma_{left} & C_{left} \cdot \gamma_{left} + C_{pierL} \cdot \gamma_{pier} & 0 \\ -C_{right} \cdot \gamma_{right} & 0 & C_{right} \cdot \gamma_{right} + C_{pierR} \cdot \gamma_{pier} \end{pmatrix}$$

Периоды колебаний и частоты при открытом ФПС составили:

$$T = [13.176; 0.191; 0.232]; \quad K = [0.477; 32.899; 27.077]$$

a)



б)

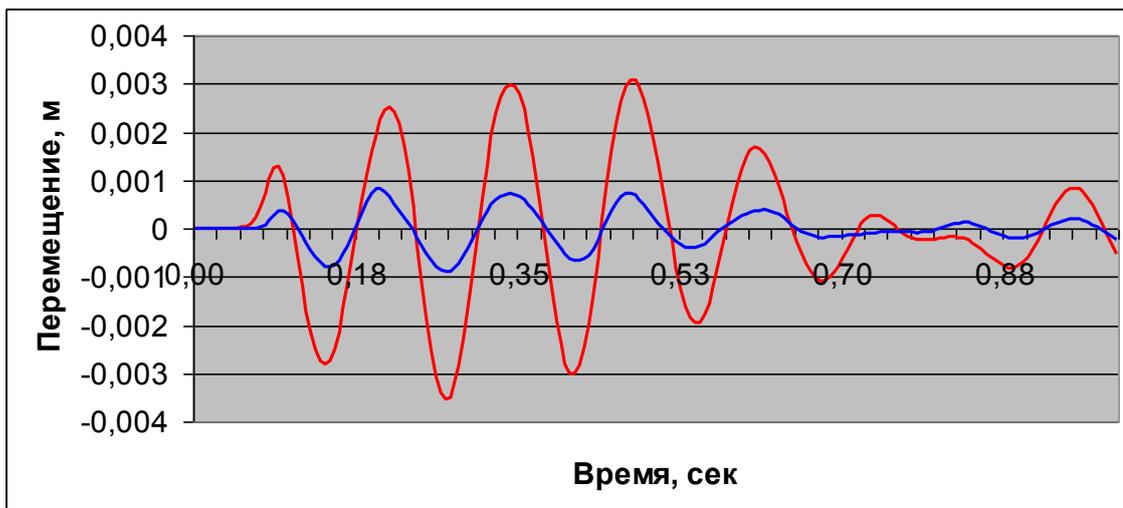


Рис.3.13. Максимальные амплитуда перемещений во времени:

а) трехпролетный мост б) четырехпролетный мост

Усилие проскальзывания в ФПС принято равным 2200 кН. С учетом приведенных спектральных характеристик системы в соответствии с принятой расчетной схемой (рис.4.7) были выполнены расчеты системы по импульсу землетрясений как в предыдущей задаче. Импульсы задавались основания сооружения. Особенности и результаты выполненных расчетов рассмотрены ниже.

III.4. Выводы по главе

В настоящей главе для реализации разработанных методов расчета к исследованию сейсмостойкости мостов проведены расчеты реальных задач. Рассмотрена схему передачи сейсмической нагрузки на устои, опирающиеся на скальное основание. В средней части моста установлено неразрезное пролетное строение, в боковых частях разрезные балки. Для того, чтобы уменьшить сейсмические воздействия на устои использованы амортизирующие демпферы с двух сторон. Построены три формы собственных колебаний моста и вычислены соответствующие частоты. Расчеты показали, что применение антисейсмического демпфера позволила уменьшить сейсмическую нагрузку на устои моста. максимальных перемещений пролетных строений в трех точках соединения с опорой.

Проведен сейсмический расчет опоры железобетонных опор балочного моста. Настоящий мост располагается на автомобильной дороге общего пользования I категории. Предполагается, что мост при землетрясении перемещается в продольном направлении. Общее сопротивление продольному перемещению оказывают опорные части на устоях и промежуточных опорах, создающие силы трения, пропорциональные скорости, и промежуточные опоры, реакции которых считаются упругими. Построены график изменения перемещений во времени для промежуточных опор. Из графиков видно, что преобладают максимальные горизонтальные перемещения.

Также проведен расчет оценки параметров сейсмозащитных устройств. К числу параметров сейсмозащитных устройств относятся упругодемпфирующие характеристики опорных частей. Фрикционно-подвижные болтовые соединения (ФПС) воспринимают горизонтальные нагрузки. Они представляют собой болтовое соединение на высокопрочных болтах с овальными отверстиями, допускающими подвижки в соединении при экстремальных нагрузках. Построены графики характеризующие демпфирующие свойство предлагаемых устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Республики Узбекистан в целом, относится к государству, на территории, которой происходят землетрясения разрушительной силы. В прошлом крупные события сейсмического характера происходили в Ташкенте, Ташкентской и Бухарской области, и на Ферганской долине.

В отличие от гражданских сооружений для мостов важными являются не только вопросы прочности и устойчивости основных несущих конструкций, но и вопросы работоспособности опор, обеспечение устойчивости и сейсмостойкости при сильных землетрясениях. Так как землетрясения происходят с образованием многочисленных трещин различных размеров в земной коре, то при образовании каждой трещины излучаются свои волны.

Очаги землетрясений имеют широкий диапазон колебаний, имеющих период от нескольких сотых долей до десятков секунд. Распространяемая сейсмическая волна, воздействует и передается на конструкции моста через фундаменты и тело опор. Уязвимость мостов к сейсмическим воздействиям весьма значительная. При расчете мостов с учетом сейсмических воздействий нормы требуют выполнять по прочности и устойчивости конструкций, а также по несущей способности грунтовых оснований фундаментов. Расчет выполняется как при наличии подвижного состава, так и без него. При расчетной сейсмичности 9 баллов проектами мостов с балочными разрезными пролетными строениями длиной более 18 м следует предусматривать сцепные антисейсмические устройства для предотвращения падения пролетных строений с опор.

Стратегии проектирования сейсмической защиты сооружений, делают изучения обеспечения сейсмостойкости мостов очень актуальной научно-технической и социально экономической проблемой.

В связи с этим целью работы является исследование и изучение сейсмостойкости мостов и путепроводов с применением различных типов антисейсмической защиты. При этом учитывать возможные направления сейсмической нагрузки на основание и фундамент.

При возникновении землетрясений возникают:

- силы бокового давления грунтов на фундаменты и опоры моста;
- давление воды, вызванное сейсмическими воздействиями;
- нагрузки инерционные от собственного веса мостовых конструкций и

полезная от подвижного состава.

Далее разработана методика расчета мостов на сейсмические воздействия с применением антисейсмических демферов. В рамках защиты сооружений от сейсмических воздействий разработаны высокоэффективные гидравлические демпферы, позволяющие ограничить воздействующие усилия на заданном проектом расчетном уровне. Функцию демпфирования сейсмических воздействий выполняют эластомерные опорные части со свинцовыми сердечниками. Совершенно новыми в этом направлении являются Маугер-сферические маятниковые опорные части скольжения, предназначенные для сейсмоизоляции сооружений. В отличие от известных в этой области маятниковых опорных частей трения американского производства, опорные части с применением в них материала «MSM®» обладают очень низким трением и, как следствие, очень высокой степенью изоляции.

Задачей гидравлических демпферов является обеспечение практически беспрепятственных перемещений при медленных (температурных) перемещениях, блокирование перемещений при увеличении скорости перемещений (вследствие сейсмических толчков, ветра, резкого торможения и т. п.) до возникновения в демпфере заданной проектом расчетной ответной реакции, а при ее превышении — перемещение, при котором происходит поглощение энергии воздействия за счет ее преобразования в тепловую энергию.

Приведена методика расчета мостовых конструкций на сейсмические воздействия и методика расчета элементов сейсмоизоляции и сейсмогашения.

Для реализации разработанных методов расчета к исследованию сейсмостойкости мостов проведены расчеты реальных задач. Рассмотрена схему передачи сейсмической нагрузки на устои, опирающиеся на скальное основание. В средней части моста установлено неразрезное пролетное строение, в боковых частях разрезные балки. Для того, чтобы уменьшить сейсмические воздействия на устои использованы амортизирующие демпферы с двух сторон. Построены три формы собственных колебаний моста и вычислены соответствующие частоты. Расчеты показали, что применение антисейсмического демпфера позволила уменьшить сейсмическую нагрузку на устои моста. максимальных перемещений пролетных строений в трех точках соединения с опорой.

Проведен сейсмический расчет опоры железобетонных опор балочного моста. Настоящий мост располагается на автомобильной дороге общего пользования I категории. Предполагается, что мост при землетрясении перемещается в продольном направлении. Общее сопротивление продольному перемещению оказывают опорные части на устоях и промежуточных опорах, создающие силы трения, пропорциональные скорости, и промежуточные опоры, реакции которых считаются упругими. Построены график изменения перемещений во времени для промежуточных опор. Из графиков видно, что преобладают максимальные горизонтальные перемещения.

Также проведен расчет оценки параметров сейсмозащитных устройств. К числу параметров сейсмозащитных устройств относятся упругодемпфирующие характеристики опорных частей. Фрикционно-подвижные болтовые соединения (ФПС) воспринимают горизонтальные нагрузки. Они представляют собой болтовое соединение на высокопрочных болтах с овальными отверстиями, допускающими подвижки в соединении при экстремальных нагрузках. Построены графики характеризующие демпфирующие свойство предлагаемых устройств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. – С.Петербург: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2001. – с. 176.
2. Шестопёров Г.С. Сейсмостойкость мостов. - М.: Транспорт, 1984. -143с.
3. Красин Н. А. Сейсмостойкость транспортных искусственных сооружений. Инженерная сейсмология. Часть 1. Учебное пособие для магистров строительного профиля. Таш ИИТ, 2005. –80 с.
4. Красин Н. А. Проектирование мостов, тоннелей и метрополитенов. Расчет оснований и прочности фундаментов глубокого заложения промежуточных опор мостов на сейсмостойкость. Учебное пособие для студентов (бакалавров и магистров) строительного профиля. ТашИИТ, 2005. –88 с.
5. Красин Н. А. Современные способы проектирования, строительство и эксплуатации тоннелей и метрополитенов. Часть 1 и 2. Учебное пособие для магистров строительного профиля. Таш ИИТ, 2005. –108 и –100 с.
6. Красин Н. А. Современные способы проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей и метрополитенов. Конструкции станций, сооружаемой закрытым способом. Учебное пособие для магистров строительного профиля. Таш ИИТ, 2005. –52 с.
7. Красин Н.А. Проектирование мостов, тоннелей и метрополитенов. Проектирование и расчет мостов на сейсмостойкость в различных странах. Учебное пособие Ташкент: Таш ИИТ, 2005.
8. Ch.S.Raupov, X.T.Qayumova. Talabalarning mustaqil ishini rejalashtirish, tashkillashtirish va o'tkazish bo'yicha tavsiyanomalar. Ta'limning qurilish yo'nalishi va mutaxassisligi talabalari va o'qituvchilar uchun. ToshTYMI. 2010. - 90 b.
9. Ч.С.Раупов, Х.Т.Қаюмова. Рекомендации по планированию, организации и проведению самостоятельной работы студентов. Для преподавателей и студентов строительных направлений и специальностей образования.

ТашИИТ, 2010. -90 с.

10.Ch.S.Raupov, .E.Raxmonov, X.T.Qayumova. 5A580212 – Ko’priklar va transport tonnellari va 5A580603 – Ko’priklar va transport tonnellaridan foydalanish magistratura mutaxassisliklari talabalariga o’qitiladigan fanlar bo’yicha mustaqil ishlarni bajarishga uslubiy ko’rsatma. ToshTUMI, 2010. -92 b.

11.Раупов Ч.С., Шермухамедов У.З. Основные проблемы строительных наук и технологий. Коснп. лекций. ТашИИТ. 2012. – 135 с.

12.КМК 2.01.03.-96. «Строительство в сейсмических районах» /Госкомархитектстрой РУз. Ташкент, 2011. -65 с.

13. Красин Н. А. Технология и механизация работ при строительстве мостов. Учебное пособие для магистров строительного профиля. ТашИИТ, 2005. – 174 с.

14.Гибшман М.Е. Проектирование транспортных сооружений. М., Транспорт, 2000. -311 с.

15.Дорман И.Я. Сейсмостойкость транспортных тоннелей. - М.: Транспорт, 2006.-175 с.

16.Колоков Н.М., Вейнблат Б.М. Строительство мостов: Учебник. – М.: Транспорт, 2004.-504 с.

17. СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. Москва, 2001. – 60 с.

18.Н.А. Красин, Ч. С. Раупов. Определение грузоподъемности и способы усиления железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов с учетом влияния дефектов и повреждений. ТашИИТ. 2005. – 103 с.

19.Ч.С. Раупов, Н.А.Красин. Нуқсон ва шикастланишлар таъсирини ҳисобга олиб темир йўл кўприклари темирбетонли оралиқ қурилмаларининг юк кўтарувчанлигини аниқлаш ва уларни кучайтириш усуллари. ТошТЎМИ. 2005. – 104 с.

20.Рашидов Т.Р., Ишанходжаев А.А. Сейсмостойкость тоннельных конструкций мелкого заложения. - Ташкент: Фан, 1993.-136 с.

21. Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов / А.И. Васильева – Москва. Стройиздат. 2002. -185 с.
22. ШНК 2.05.03-11 «Мосты и трубы» Ташкент, 2011. -446 с.
23. Бреслер, М. Анализ применения новых конструктивных решений в области систем защиты мостовых сооружений от воздействий, вызванных перемещениями [Текст] / М. Бреслер // Дороги і мости: зб. наук. пр. в 2 т: Т. 1 / ДерждорНДІ. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – Вип. 7. – С. 48-52.
24. Косяк, В. М. Розвиток конструктивних форм елементів мостів для роботи в умовах сейсмічних впливів [Текст] / В. М. Косяк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 5. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2005.
25. Килимник, Л. Ш. Методы целенаправленного проектирования в сейсмостойком строительстве [Текст] / Л. Ш. Килимник. – М.: Наука, 2005.
26. Кузнецова, И.О. Сейсмоизоляция – способ проектирования сооружений с заданными параметрами предельных состояний и сценариев накопления повреждений / И.О. Кузнецова, Ван Хайбинь, А.М. Уздин, С.А. Шульман // В сб. Избранные статьи профессора О.А.Савинова и ключевые доклады, представленные на шестые савиновские чтения. СПб. – 2010. - С. 105 – 120.
27. Кузнецова, И.О. Оценка хода подвижных опорных частей при сейсмическом воздействии / И.О. Кузнецова, А.В. Лунев, А.С. Ткаченко, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. М. ВНИИТПИ. – 2002. Вып.2. - С. 7 – 8.
28. Кузнецова, И.О. К вопросу об оценке коэффициентов сочетаний сейсмической и железнодорожной нагрузки / И.О. Кузнецова, О.А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. – 2006. № 3. - С. 21 – 25.
29. Кузнецова, И.О. Современные проблемы сейсмостойкости мостов. (По материалам 12-ой Европейской конференции. Лондон. Сентябрь. 2002) / И.О. Кузнецова, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. № 4. - С. 63 – 68.
30. Сахаров, О.А. К вопросу о назначении коэффициентов сочетаний сейсмической и других нагрузок / О.А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. – 2003. № 2.

31. Сахаров, О.А. Назначение расчетного ускорения с учетом новых карт сейсмического районирования / О.А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. № 2. 2003. - С. 48 – 49.
32. Сахарова, В.В. К вопросу об антисейсмическом усилении мостов / В.В. Сахарова, Ю.М. Сильницкий, А.М. Уздин, С.А. Шульман // Улучшение эксплуатационных качеств и содержания мостов и водопропускных труб. Л. ЛИИЖТ. – 2000. - С. 3 – 18.
33. Сахарова, В.В. Использование пролетного строения для гашения сейсмических колебаний опор мостов / В.В. Сахарова, А.А. Симкин, А.А. Никитин, А.М. Уздин // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. - 2002. Вып. 4. - С. 14 - 18.
34. Курзанов, А.В. Натурные исследования трехэтажного фрагмента и пятиэтажного здания на сейсмоизолирующих опорах / А.В. Курзанов, А.М. Ахмедов // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. – 2004. Вып. 2 – 3. - С. 24 - 32.
35. Vashi, K.M. "Seismic Spectral Analysis for Structures Subject to Non-Uniform Excitation." 83-PVP-69, ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Portland, Oreg. 2015.