

ского микрорайонирования. На основе расчетной сейсмичности принимаются пиковые значения ускорений грунта основания: при 7 баллах  $a_{\max} = 0,1g$ ; при 8  $a_{\max} = 0,2g$ ; при 9  $a_{\max} = 0,4g$ .

Теория сейсмостойкости сооружений зародилась после разрушительного японского землетрясения 1891 года. Омори в 1900 году провел специальные опыты, на основе результатов которых была разработана методика определения сейсмических сил, получившая название статической теории сейсмостойкости, позволившая впервые получить количественную оценку таких сил. Ее суть состоит в том, что деформации сооружения не учитываются, а его колебания сводятся к переносному движению вместе с основанием. Дальнейшим этапом в истории развития теории сейсмостойкости сооружений был линейно-спектральный метод, который предложен М. Био в 1941 году. В нем были введены в обращение спектральные кривые, представляющие зависимости максимальных ускорений, скоростей или перемещений линейного осциллятора от функции периода его собственных колебаний. Внедрение спектральной теории в практику проектирования позволило существенно повысить надежность и эффективность сейсмостойкого строительства. Основным недостатком линейно-спектральной теории является ее неприменимость к нелинейным системам.

Основные способы обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений представлены в работе [5]. В их основе лежит, как правило, линейно-спектральный метод расчета сейсмостойкости. В районах, отличающихся высокой сейсмической активностью, распространение получают новые специальные методы, которые позволяют повысить надежность возводимых конструкций при существенном снижении затрат на усиление. К числу таких методов относятся, в частности, применение сейсмоизоляции и динамических гасителей колебаний.

#### Список литературы

- 1 Гутенберг, Б. Основы сейсмологии / Б. Гутенберг. – М. : ОНТИ, 1938. – 149 с.
- 2 Курбацкий, Е. Н. Сейсмостойкость мостов. Теория и приложения : учеб. пособие / Е. Н. Курбацкий, Е. А. Пестрякова, И. И. Зернов. – М. : АСВ, 2021. – 276 с.
- 3 Медведев, С. В. Инженерная сейсмология / С. В. Медведев. – М. : Госстройиздат, 1962. – 284 с.
- 4 СП 14.13330.2018. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. – Введ. 2018-11-25. – 165 с.
- 5 Ньюмарк, Н. Основы сейсмостойкости строительства / Н. Ньюмарк, Э. Розенблут ; пер. с англ. Г. Ш. Подольского; под ред. Я. М. Айзенберга. – М. : Стройиздат, 1980. – 344 с.

УДК 699.841

## СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

*С. Н. СКЛЯРОВ*

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,  
Российская Федерация*

Разрушительные землетрясения уносят жизни тысяч людей, наносят огромный урон экономике, заставляют людей задуматься и принять необходимые меры для создания средств сейсмозащиты для предотвращения катастрофических последствий. В последние годы было проведено большое количество исследований для оценки поступающей энергии при землетрясениях и разработки устройств, позволяющих сберечь сооружения. Мосты очень уязвимы к сейсмическим воздействиям. Во-первых, они обладают малым демпфированием (менее 5 %), а во-вторых, собственные частоты совпадают с частотами сейсмических воздействий [1]. Уменьшить реакцию сооружения реально, благодаря специальным демпфирующим устройствам, которые позволяют уменьшить разрушения сооружений при сейсмических воздействиях.

1 Эластомерные (резинометаллические) опорные части. В конце прошлого века Робинсоном и Келли было найдено удачное сочетание эластичных материалов с металлическими пластинами [2, 3], которое позволило создать резинометаллические опоры, которые получили значительное распространение в Японии, США, Новой Зеландии, России и др. странах. Данные опорные части располагаются на устоях либо промежуточных опорах под пролётными строениями и включают цилиндры или прямоугольные параллелепипеды из натуральной или синтетической резины и металлических листов. Резина обеспечивает поперечную податливость и защищает стальные листы от коррозии, покрывая все внешние поверхности, а металлические листы обеспечивают вертикальную жёсткость. Выделяются несколько групп таких опорных частей, для определения характеристик которых проводятся динамические испытания.

Из *натуральной или синтетической резины, обладающей малым коэффициентом демпфирования* (всего 2–3 %). К их преимуществам относятся простота производства и простая расчётная схема, в которой реакция опорной части не зависит от значения нагрузки, характера её изменения во времени, а также от температуры окружающей среды и времени (материал не подвержен старению). Недостатком является необходимость установки дополнительных демпфирующих устройств.

*С большим коэффициентом демпфирования*, от 10 до 20 %, причем здесь реализуются деформации сдвига порядка 100 %. Для увеличения данного показателя в резину необходимо добавить тонкодисперсную сажу, канифоль и другие специально подобранные добавки.

*Со свинцовым стержнем и малым коэффициентом демпфирования.* Здесь стальные пластины обеспечивают вертикальную жёсткость и ограничивают поперечное выпучивание резины. Впрессованный в опорную часть свинцовый стержень обеспечивает рассеяние энергии вследствие текучести свинца. В начальный момент его напряжение текучести равно 10,5 МПа, а при циклическом нагружении оно уменьшается из-за повышения температуры. Свинец перекристаллизуется при нормальной температуре, поэтому усталостные явления не проявляются.

2 **Фрикционные опорные части.** Они представляют собой набор концентрических стальных пластин с тефлоновым покрытием, причём внутри опорной части в центре находится резиновый сердечник, а на некотором расстоянии от центра располагаются несколько резиновых стержней. Такие опорные части достаточно популярны при сейсмоизоляции мостовых конструкций, поскольку уменьшают силы, передающиеся при воздействии землетрясения на пролётное строение моста, вследствие его перемещения на опорных частях с малым коэффициентом трения. Работа сил трения и рассеяние её в виде тепла в окружающее пространство ведут к снижению кинетической энергии системы. Особенностью данных опорных частей является широкий диапазон частот, в котором они эффективно рассеивают энергию сейсмических воздействий и уменьшают амплитуды колебаний элементов конструкций.

3 **Фрикционные маятниковые опорные части.** Такие опорные части состоят из двух тел, соприкасающихся по сферическим поверхностям одинакового радиуса, что обеспечивает равномерную передачу нагрузок. На поверхности наносятся покрытия, уменьшающие силы трения. Для предотвращения загрязнений области контакта в большинстве случаев используются устройства с поверхностями, вогнутыми вниз. Коэффициент трения между скользящими поверхностями определяет величину рассеиваемой энергии, которая может составлять в зависимости от требований от 5 до 35 %. Если для увеличения периода колебаний при использовании эластомерных изоляторов требуется увеличивать их высоту, которая ограничивается условием устойчивости, то в случае фрикционных маятниковых опорных частей этого можно добиться изменением их радиусов. Другим преимуществом таких опорных частей является их высокая несущая способность – до 130000 кН, позволяющая применять их в большепролётных мостах [4].

4 **Демпфирующие устройства.** В настоящее время в России, как и во многих других технически развитых странах (в частности, и в США), отсутствуют нормативные документы, связанные с расчётами демпфирующих устройств для мостов. Поскольку такие демпфирующие устройства появились относительно недавно, то нахождение их рабочих характеристик осуществляется на основе испытаний.

*Гидравлические демпферы* представляют собой цилиндры, наполненные вязкой жидкостью, в которых перемещаются поршни, которые перемещают жидкость через малые отверстия или щели, в результате чего возникает сила сопротивления. В последние десятилетия гидравлические демпферы были использованы в проектах мостов, например Golden Gate Bridge в Сан-Франциско. Расчётные максимальные перемещения поршней в нем составляют 1250 мм, пиковое значение скорости – 1880 мм/с. При этом создаётся максимальная сила – 2890 кН. Гидравлические демпферы обладают следующими достоинствами: надёжность; их характеристики незначительно зависят от температуры; они не увеличивают жёсткость конструкции; допускают применение при больших значениях сил и перемещений; фазы демпфирующих сил не зависят от фаз, возникающих в конструкциях упругих сил; при расчётах возможно использование линейных моделей; изготавливаются многочисленными производителями. Недостатком гидравлических демпферов является высокая стоимость.

*Вязкоупругие демпферы* состоят их стальных листов и вязкоупругих прокладок, выполненных из резиноподобного полимера. Средние стальные пластины прикрепляются к конструкции. При смещении стальных пластин полимерные прокладки испытывают деформации сдвига. При этом происходит нагрев материала, и тепло, образовавшееся при нагревании, рассеивается в окружающую среду. Применение вязкоупругих демпферов началось более 40 лет назад. В первое время эти демпферы использовались для уменьшения ветровых нагрузок.

5 **Деформационные швы.** Такие швы позволяют ограничить возможные повреждения сооружений в сейсмически активных зонах. Они обеспечивают безопасность и допускают проезд как во время, так и

после землетрясения. Чаще всего используют деформационные швы двух видов: с системой Fuse Box (устройство с заданным местом разрушения) и с поворотными траверсами. Например, мост с системой Fuse Box был установлен в Перу (Chilina Bridge), а с поворотными траверсами – в Греции (Рион-Антирион).

#### Список литературы

- 1 Курбацкий, Е. Н. Сейсмостойкость мостов. Теория и приложения : учеб. пособие / Е. Н. Курбацкий, Е. А. Пестрякова, И. И. Зернов. – М. : АСВ, 2021. – 276 с.
- 2 Skiner, R. I. An introduction to seismic isolation / R. I. Skiner, W. H. Robinon, G. H. McVerry. – New Zealand : JohnWiley&Sons, 1993. – 353 p.
- 3 Kelly, J. M. Earthquake resistant design with rubber / J. M. Kelly. – London etc : Springer-Verl., 1997. – 243 p.
- 4 Nazzal S. Armoutti. Earthquake Engineering: Theory and Implementation US / N. S. Armoutti. – International Code Council, 2008. – P. 538.

УДК 621.181.27:662.9

### ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖАРОТРУБНОГО КОТЛА В SOLIDWORKS SIMULATIONS

*А. З. СКОРОХОД, Д. С. ПУПАЧЕВ, В. Л. МОИСЕЕНКО*  
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Проектирование жаротрубных котлов осуществляют посредством выполнения двух расчетов, дополняющих друг друга: теплового и прочностного. Тепловой расчет производится для определения размеров топочного объема, радиационных и конвективных поверхностей нагрева, обеспечивающих номинальную производительность котла при заданных рабочих параметрах. Его целью является разработка проекта нового котла при заданных характеристиках топлива, производительности и параметрах получаемого теплоносителя (пара или горячей воды).

Расчет на прочность жаротрубных котлов помогает обеспечить безопасную и надежную эксплуатацию котла, учитывая различные эксплуатационные факторы.

К методам расчета на прочность относят:

– аналитический метод, основанный на уравнениях механики деформированного тела. Методика расчета описана в РД 10-249 [1]. Он позволяет получить аналитические выражения для определения напряжений и деформаций в стенках котла. Аналитический метод обычно используется в сочетании с экспериментальными данными для точной оценки нагрузок и прочности;

– Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из наиболее распространенных методов расчета на прочность котлов. Он основан на разбиении объекта на конечные элементы, для которых решаются уравнения равновесия с учетом граничных условий.

– Методы прочностного расчета позволяют учесть сложную геометрию и нагрузки, а также провести анализ напряжений в различных точках котла, что помогает предотвратить повреждения и аварии, а также повысить эффективность и долговечность жаротрубных котлов. Внутреннее давление – наиболее критический параметр, который оказывает воздействие на стенки котла. Необходимо учитывать максимальное рабочее давление и его возможные перепады. Также важно учитывать наличие высокой температуры, которая может привести к деформациям и повреждениям материала.

Практический интерес представляет сравнение результатов, полученных двумя указанными методиками.

Одними из наиболее энергетически эффективных водонагревательных устройств котельной техники малой мощности являются многоходовые (2-, 3-ходовые) горизонтальные котлы жаротрубного типа.

Конструктивно такой котел (рисунок 1) состоит из цилиндрической жаровой трубы 1, конвективного пучка дымогарных труб 2, переднего 7 и заднего 5 днищ, поворотной камеры 3 с установленным в ней предохранительным взрывным клапаном 4 и патрубком дымовой трубы 6. Особенностью данной конструкции является интенсификация радиационной и конвекционной составляющих теплоотдачи от продуктов горения к нагреваемой поверхности жаровой трубы 1, в которой происходит сгорание сжигаемого топлива, а также дымогарных труб малого диаметра 2, по которым на большой скорости перемещаются дымовые газы [2, 3].

На рисунке 2 показана расчетная модель, состоящая из жаровой трубы и стенки передней. Согласно тепловому расчету, жаровая труба имеет размеры: длина  $L_{ж}$  – 2900 мм, внутренний