Список использованных источников

1. HYDROMATIC GmbH (Германия).

2. Дегремон. Технический справочник по обработке воды : в 2 т. : пер. с фр. – СПб. : Новый журнал, 2007.

3. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы : пер. с англ. / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. – М. : Мир, 2004. – 480 с.

4. Литманова, Н. Л. Совершенствование технологии локальной очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.04 / Наталия Леонидовна Литманова. – Санкт-Петербург, 2007. – 17 с.

5. Исследование биологической очистки сточных вод молокозаводов на модельном стоке / С. В. Степанов, О. С. Солкина, К. М. Морозова [и др.] // Технологии очистки воды «Техновод-2016»: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 210–215.

УДК 699.841

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ СДВИГОВОГО ТИПА

*Магистрант **Ш. А. Эшонхужаева***
*Научный руководитель – **Е. А. Мойсейчик**, д. т. н., проф. кафедры "Мосты и тоннели", Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: mit_ftk@bntu.by*

Реферат

На основании анализа литературных источников показано, что стальные энергопоглотители, использующие работу активных элементов в упругопластической и пластической стадиях работы, могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений. В статье предложены места расположения упругопластических стальных энергопоглотителей в пролетных мостовых конструкциях и показана их энергетическая эффективность. Экспериментально, с использованием лабораторных образцов из малоуглеродистой пластичной стали доказано, что в окрестности конструктивно-технологических дефектов (отверстия, вырезы) в растянутых и сдвигаемых элементах конструкций ЭП происходит локализация деформаций, особенно при упруго-пластической и пластической стадиях работы стали, с повышением средней температуры поверхности стали при деформировании на несколько десятков градусов (до 90 ^{o}C), что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглотителей.

Ключевые слова: сейсмостойкость, энергопоглотители, деформации сдвига, энергоемкость, теплообразование.

Введение

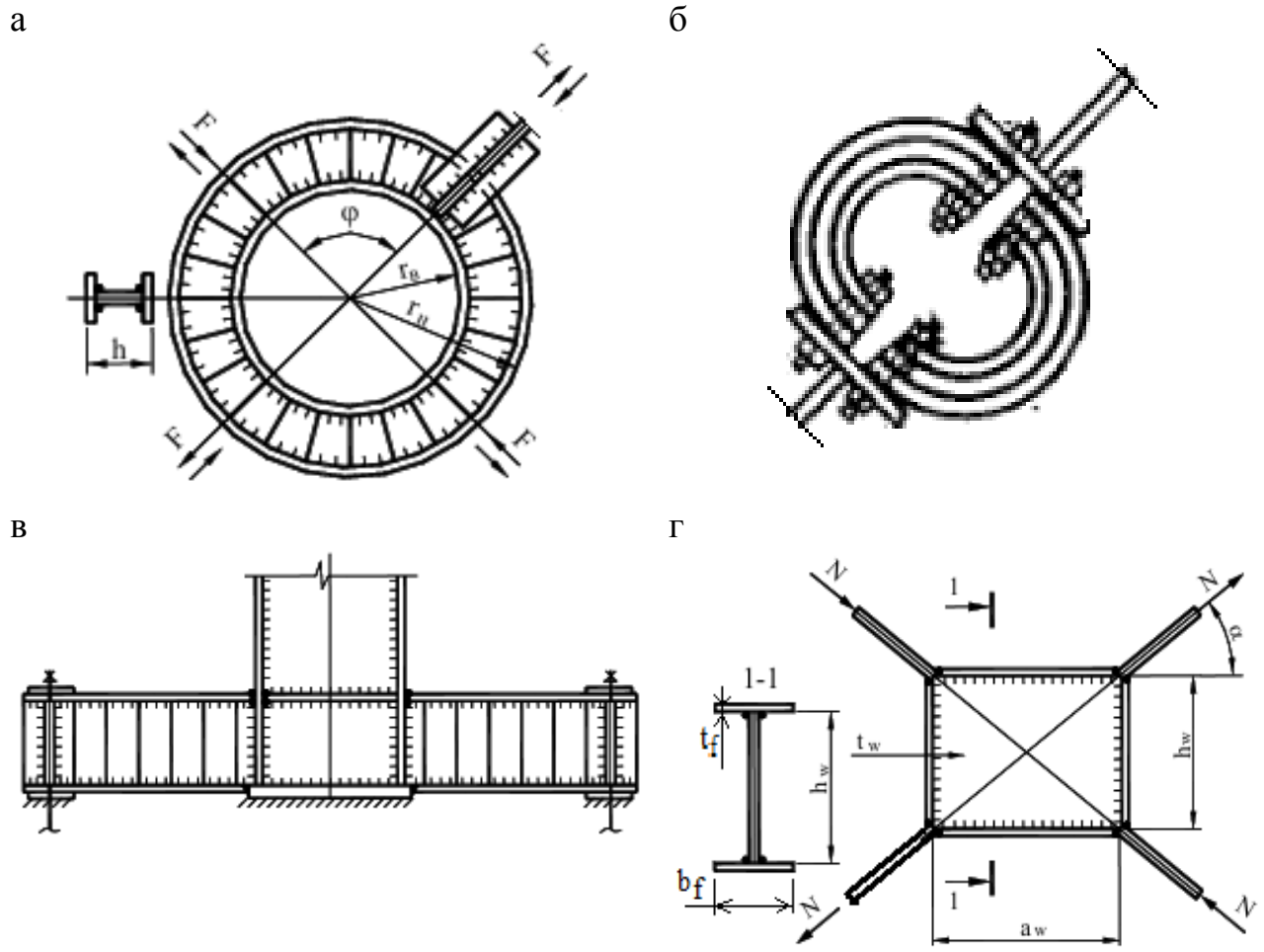
Территория Узбекистана подвержена воздействию разрушительных землетрясений, которые происходили в глубокой древности и возникали относительно недавно [1]. Землетрясения интенсивностью более семи баллов приводили к заметным нарушениям работоспособности искусственных сооружений на железных и автомобильных дорогах. Особенно это проявляется для массивных конструкций, на элементы которых действуют большие инерционные силы при сейсмических воздействиях. Повреждения опор, железобетонных и сталежелезобетонных балок мостов возникают, в основном, в опорных и пролетных строениях и проявляются в трещинообразовании, смещениях, осадках и разрушении опор; разрушении опорных частей пролетных строений, смещении и падении пролетных строений, разрушении соединительных элементов и др. [2]. Повышения устойчивости положения пролетных строений мостовых конструкций при землетрясениях достигают устройством различных ограничителей перемещений вдоль и поперек осей сооружения, специальных антисейсмических устройств, не допускающих раскрытия деформационных швов и др. [2]. Снижения названных повреждений можно достичь установкой демпфирующих устройств в сопряжениях между опорами мостов и пролетными балками. Демпферы поглощают энергию сейсмических ударов, снижают передающиеся на пролетные конструкции сейсмические ускорения [4–9]. Такие энергопоглощающие устройства разработаны для сооружений различной массы [5, 6]. Сейсмопоглотители, активные элементы которых выполнены из пластичной стали, используют работу материала в упруго-пластической и пластической стадии и надежно обеспечивают работоспособность массивных зданий и сооружений (многоэтажные жилые и производственные здания, различные сооружения) [6, 7]. Энергопоглощающие элементы в зданиях и сооружениях в каждом полуцикле колебаний преобразуют механическую энергию землетрясения, передающуюся на строительные конструкции, в другие виды энергии (в основном, тепловую) и предотвращают разрушения основных несущих конструкций при возможных пиковых перегрузках во время землетрясений. Поглощенная энергия преобразуется в тепловую и отводится в окружающую среду. Температура стальных активных элементов, преобразующих механическую энергию в тепловую, достигает 120–150 ^{o}C [9].

Энергопоглотители этого типа могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений. В настоящей статье рассмотрим схемы применения упругопластических стальных энергопоглотителей в пролетных мостовых конструкциях и их энергетическую эффективность.

Основная часть

Классификацию энергопоглотителей (далее – ЭП) производят исходя из физических принципов работы сейсмозащиты сооружений, конструктивных особенностей поглотителей сейсмической энергии, материала и стадии его деформирования, сопряжения энергопоглотителей с защищаемым сооружением и др. [5]. В качестве активных поглотителей энергии используются демпферы различных принципов действия, адаптивные системы, системы с гасителями колебаний, сейсмические экраны, завесы и др.

Простыми по конструкции, надежными в работе и обладающими высокими демпфирующими свойствами являются поглотители сейсмической энергии, принцип действия которых основан на повторно-переменном упругопластическом деформировании низкоуглеродистой стали (рисунок 1). Их эффективность доказана более чем полувековой надежной работой многоэтажных зданий и промышленных сооружений с ЭП в Казахстане, других государствах Средней Азии [5, 6]. Такие ЭП приспособлены для изготовления на заводах металлических, в т. ч. мостовых конструкций.



а – кольцевой; б – трубчатый; в – балочный; г – сдвиговой

Рисунок 1 – Упругопластические энергопоглотители [9]

Однако в мостах, расположенных в сейсмоопасных районах, эти ЭП не применялись. Проектирование таких ЭП может выполняться по действующим нормам Республики Казахстан [9, 10].

Основные типы упругопластических ЭП представлены на рисунке 2.

Рассмотрим особенности проектирования ЭП сдвигового типа (далее – ЭПС) [6]. Активным элементом ЭПС, воспринимающим и преобразующим сейсмическую энергию, является стенка. Ее требуемая площадь поперечного сечения определяется из условий работы на сдвиг:

$$A_w = \frac{T_w}{0{,}5\sigma_{ту}}, \quad (1)$$

где $T_w = 2Ncos\alpha - \frac{\sigma_{ту} b_f t_f^2}{h_w}$ – усилие, сдвигающее стенку ЭПС вдоль горизонтальной оси;

N – усилие, действующее на ЭПС (рисунок 2г);

$\sigma_{ту} = 1{,}4R_y$, R_y – расчетное сопротивление стали.

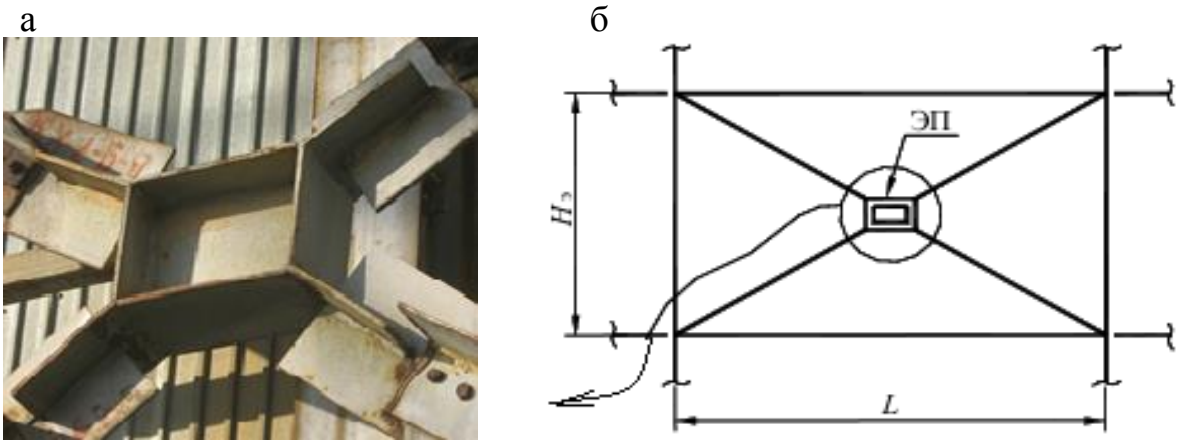


Рисунок 2 – Вид энергопоглотителя сдвигового типа, установленного в связевую систему многоэтажного здания [9]

Окончательно толщину стенки назначают из условия обеспечения ее местной устойчивости не менее 1/30 h_w.

Толщину t_f каждой из четырех пластин, передающих сдвиговые усилия на активный элемент толщиной t_w, назначают из условия прочности:

$$t_f = Ncos\alpha/(b_f 0{,}8\sigma_{ту}), \quad (2)$$

где 0,8 – коэффициент условий работы.

Эффективность поглощения энергии землетрясений ЭП, работающих в упругопластической стадии на переменные нагрузки от землетрясений. Опыт эксплуатации многоэтажных зданий со стальным каркасом в сейсмоопасных районах показал, что за период эксплуатации они воспринимают около 80 циклов знакопеременных сейсмических нагрузок [6]. Сравнить энергоемкость различных ЭП при знакопеременных нагрузках можно по удельной энергопоглощающей способности $W_ц$. В качестве критерия Г. М. Остриковым предложено рассматривать поглощающую способность единицы массы активного элемента ЭП, «определенную при одинаковом уровне максимальных относительных деформаций материала за пределом упругости» и отнесенную к одному циклу переменной нагрузки [6].

Поглощенная при пластическом деформировании активного элемента удельная энергия $W_ц$ определяется работой внутренних напряжений на соответствующих пластических деформациях. В работе [6] предложены формулы для

расчета удельной энергии $W_{ц}$, поглощаемой активным пластинчатым элементом ЭП за один цикл жесткого нагружения при его работе:

– на растяжение
$$W_{цр} \approx 2\sigma_{ту}^2(e-1)/E\gamma; \quad (3)$$

– на изгиб
$$W_{цр} \approx 1{,}15\sigma_{ту}^2(e-1)^2/eE\gamma; \quad (4)$$

– сдвиг
$$W_{цр} \approx 1{,}73\sigma_{ту}^2(e-1)/E\gamma, \quad (5)$$

где $e = \varepsilon/\varepsilon_{т}$ – уровень пластического деформирования; γ – угол сдвига.

При выводе формул предполагалось, что активные элементы ЭП не содержат концентраторов деформаций, а пластические деформации определяются условием пластичности Генки-Мизеса.

Из зависимостей (3) – (5) следует, что наибольшей удельной энергоемкостью обладают активные элементы ЭП, выполненные из пластичных сталей ВСт3сп5, 09Г2С и подверженные в процессе работы деформациям растяжения-сжатия и сдвига. Применение их в мостовых конструкциях для повышения сейсмостойкости пролетных строений мостов и зон их сопряжений с опорами потребует соответствующей доработки конструктивных форм ЭП и дополнительных исследований их работы.

Поля температур поверхности образцов ЭПС. Общие виды образцов ЭПС показаны на рисунке 3а. Размеры образцов – 220 × 220 мм, толщина листов – 10 мм. Материал – ВСт3пс6. Нагружение производилось в испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка – удлинение» квазистатически, растягивающим усилием до разрушения. Испытания и обработка данных выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000», а обработка результатов велась программным пакетом IRTIS.

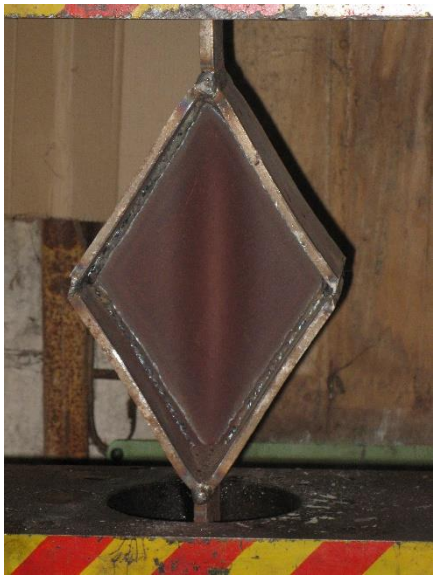
Машинные диаграммы деформирования образцов ЭПС представлены на рисунке 4. Кадры термофильма образца без конструктивных дефектов в стенке приведены на рисунке 5, из которого следует, что температурное поле в упругой стадии работы материала стенки равномерное, без аномалий. Также нет аномалий при работе материала стенки в пластической стадии. В стадии самоупрочнения металла неоднородность появляется при образовании волны в стенке (рисунок 3б).

В образцах с конструктивными дефектами (отверстия, вырезы) температурные аномалии проявляются при переходе от упругой работы стали к упруго-пластической и сопровождаются непрерывным ростом температуры в месте зарождения и развития трещины.

Возможное расположение ЭП в мостовых балочных сооружениях. Предполагаем, что устои моста и промежуточные опоры выполнены в соответствии с требованиями норм проектирования сейсмостойких мостов. Тогда энергопоглотители целесообразно устанавливать в местах сопряжений пролетных строений с опорами, конструкций пролетных строений между собой.

а

б



в

г

а – образцы ЭПС перед испытанием; б – вид образца типа ЭПС с активным элементом без конструктивных концентраторов; в – вид образца типа ЭПС с отверстием в середине активного элемента; г – вид образца типа ЭПС с боковыми вырезами в активном элементе

Рисунок 3 – Экспериментальные энергопоглотители ЭПС и их вид в стадии предразрушения

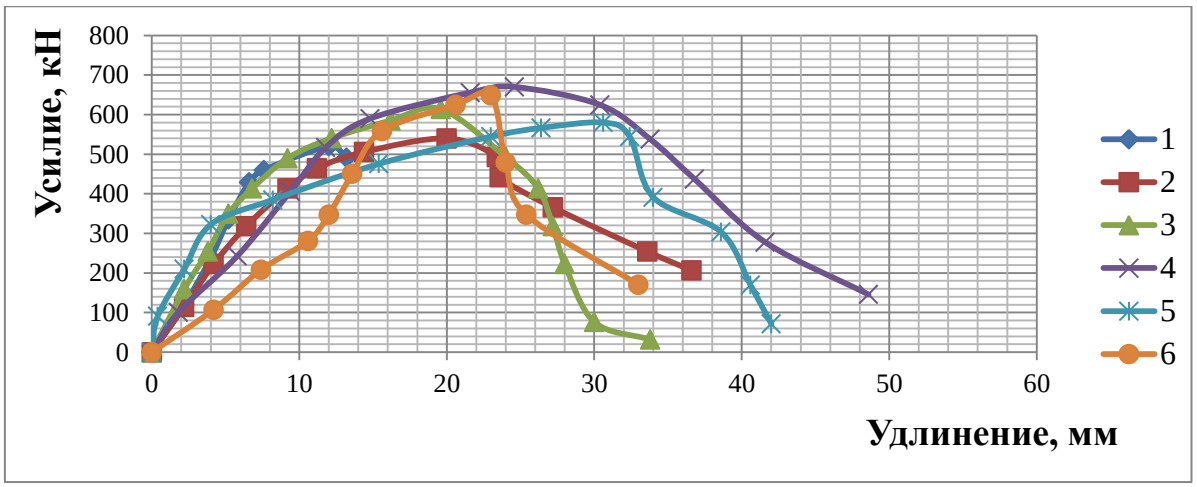


Рисунок 4 – Диаграммы «усилие – удлинение» по данным растяжения экспериментальных сдвиговых образцов с конструктивными дефектами и без них в машине Р-100

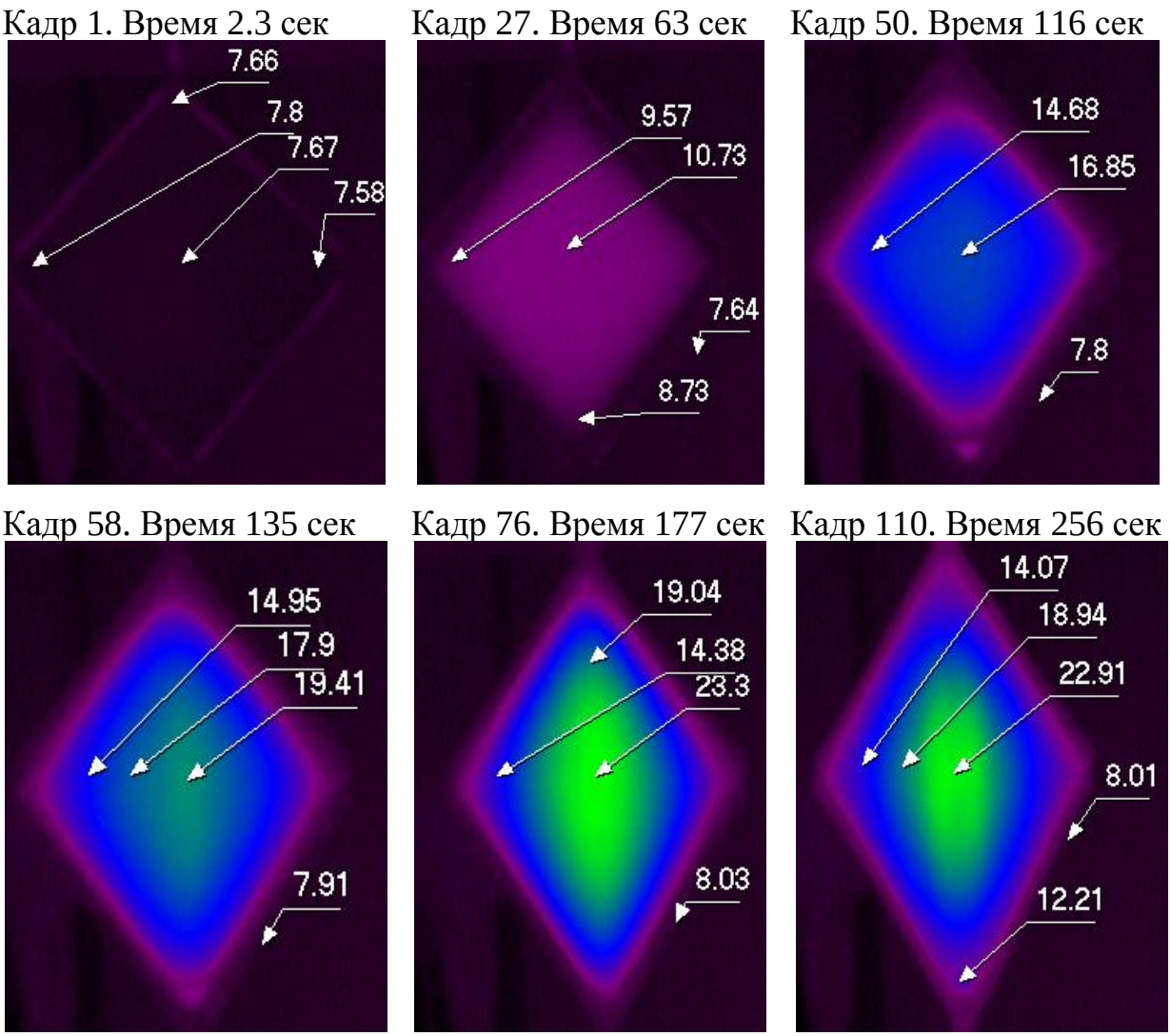


Рисунок 5 – Кадры термофильма деформационного нагрева образца без дефектов в стенке

Заключение

1. На основании опыта строительства и эксплуатации многоэтажных сейсмостойких зданий, оснащенных энергопоглотителями с активными стальными элементами, работающими в упругопластической и пластической стадиях, предложено отдельные из них (ЭПС и др.) применять для повышения сейсмостойкости пролетных строений мостов и зон их сопряжений с опорами с соответствующей доработкой конструктивных форм ЭП и дополнительными исследованиями их работы.

2. Экспериментально, с использованием лабораторных образцов из малоуглеродистой пластичной стали доказано, что в окрестности конструктивно-технологических дефектов (отверстия, вырезы) в растянутых и сдвигаемых элементах конструкций ЭП происходит локализация деформаций, особенно при упруго-пластической и пластической стадиях работы стали, с повышением средней температуры поверхности стали при деформировании на несколько десятков градусов, что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглотителей.

Список использованных источников

1. Газлийские землетрясения 1976 г. Геолого-геофизическая природа очагов. – М. : Наука, 1984. – 200 с.

2. Шестоперов, Г. С. Сейсмостойкость мостов / Г. С. Шестоперов. – М. : Транспорт, 1984. – 143 с.

3. Гельфер, А. А. Разрушение мостовых опор и меры их защиты / А. А. Гельфер. – М. : Изд-во НКХ РСФСР. 1938 – 150 с.

4. Шермухамедов, У. З. Гашение продольных сейсмических колебаний опор балочных мостов с сейсмоизолирующими опорными частями: автореф. дисс…канд. техн. наук: 05.23.11 / У. З. Шермухамедов / ФГОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения». – М., 2010. – 21 с.

5. Мартынов, Н. В. Активная сейсмозащита: варианты развития и критический анализ практических возможностей : монография / Н. В. Мартынов. – Симферополь : [б. и.], 2013. – 267 с.

6. Остриков, Г. М. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий: монография/ Г. М. Остриков, Ю. С. Максимов. – Алма-Ата : Казахстан, 1985. –120 с.

7. Строительные нормы. Пособие по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий в развитие СНиП РК 2.03-04-2001. Часть 2. – Приняты и введены в действие МИТ РК от 03.11.2004 г. № 426 с 1 марта 2005 г. – Алматы : ТОО «Институт Проектстальконструкция», 2005. –52 с.

8. Поляков, В. С. Современные методы сейсмозащиты зданий / В. С. Поляков, Л. Ш. Килимник, А. В. Черкашин. – М. : Стройиздат, 1989. – 320 с.

9. Проектирование сейсмостойких зданий. Часть 1. Проектирование зданий из стальных конструкций. НТП РК 08-01.5-2013. – Астана, 2024. – 251 с.

10. Нормативно–техническое пособие Республики Казахстан. Проектирование стальных конструкций. Часть: стальные мосты. НТП РК-03-02.1-2012 (к СН РК EN 1993-2:2006/2011). – Астана, 2015. – 152 с.