

На правах рукописи

ШИВУА Аондовасе Джон

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА
СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Специальность: 05.23.17 – Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рутман Юрий Лазаревич

Официальные оппоненты: **Уздин Александр Моисеевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I»,
кафедра теоретической механики, заместитель
заведующего по научно-исследовательской работе

Смирнова Любовь Николаевна,
кандидат технических наук, заведующая
лабораторией сейсмостойкости сооружений
и инновационных методов сейсмозащиты
(ЛССИМС), ЦИСС ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко
АО «НИЦ "Строительство"», г. Москва

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Дагестанский государственный
технический университет»** (г. Махачкала)

Защита диссертации состоится 28 декабря 2016 г. в 14.⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Лидия Никитовна Кондратьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Поведение сооружения во время землетрясений определяется количеством энергии, поступившей в структурные элементы системы. Эта энергия находится в сложной зависимости от интенсивности, частотного состава, длительности движения грунта, а также от структурных параметров системы.

Энергетический метод расчета сейсмостойкости подразумевает оценку поступившей в сооружение энергии и ее распределение между различными структурными элементами сооружения. Сейсмостойкость означает, что энергия, которую сооружение может поглощать без разрушения, больше, чем реально поглощенная сейсмическая энергия. Несмотря на многочисленные исследования, обосновывавшие применение сейсмической входной энергии как меры потенциального повреждения сооружения, энергетический метод не получил широкого применения в сейсмостойком строительстве. Это связано с тем, что предложенные способы оценки сейсмической энергии, поступившей в систему во время землетрясения, оказывались либо не консервативными (оценивали в ряде случаев не в запас), либо оценка оказывалась слишком завышенной. Кроме того, не предлагались достаточно ясные алгоритмы, устанавливающие связь между поступившей в сооружение энергией и его прочностными характеристиками.

Поиск нового эффективного метода оценки входной энергии и обоснование связи между входной энергией, поступившей в сооружение, и фактическим повреждением определяет актуальность выбранной темы.

Настоящая работа посвящена разработке консервативного, но дающего разумный запас способа оценки входной энергии, поступившей в сооружение, и методов, связывающих эту оценку с прочностными критериями.

Степень разработанности темы исследования. С началом второй половины прошлого столетия специалисты стали развивать научное направление, которое рассматривает сейсмическую энергию как меру повреждения зданий и сооружений. Основным интерес к использованию энергетических концепций в сейсмостойком проектировании начался с работы Хаузнера 1956 г., озаглавленной «Проектирование сейсмостойких сооружений по предельному состоянию» (*Limit Design of Structures to Resist Earthquake*), на первой Всемирной конференции по сейсмостойкому строительству.

В течение 1960 – 1990г.г. ряд исследователей представили работы, в которых обсуждалось использование предложенных Хаузнером энергетических концепций для проектирования сейсмостойких конструкций. Среди них следующие ученые: Дж.А. Блум (J.A. Blume), Г.В. Берг и С.С. Томэйдес (G.V. Berg and S.S. Thomaidis), А.С. Велетсос, Н. М. Ньюмарк и Ц.В. Челапати (A.S. Veltsos, N.M. Newmark and C.V. Chelapati), П.Ц. Дженнингс (P.C. Jennings), Б. Като и Х. Акияма (B. Kato and H. Akiyama), С.Ц. Гол и Г.В. Берг (S.C. Goel and G.V. Berg) и Дж.Ци. Андерсон и В.В.Бертеро (J.C. Anderson and V.V. Bertero), П. Фаджфар и др. (P. Fajfar et al.), Х. Кравинклер (H. Krawinkler), Х. Кувамуре и Т. В. Галамбос (H. Kuwamura and T.V. Galambos), Т. Минами и Вай. Осава (T. Minami and Y. Osawa), С.Л. Маккейб и Холл (S.L. McCabel and W.J. Hall),

Дж.М. Тембилкар (J.M. Tembulkar) и Дж.М. Нау (J.M. Nau), С. Лелатавивуат (S. Leelataviwat), С. Отани и Л. Ёе (S. Otani and L.Ye), В.Е. Мак-Кевитте (W.E McKevitte) и Т. Ф. Захрах и Дж.Ву. Халл (T.F. Zahrah and J.W Hall). Несколько попыток было предпринято, чтобы улучшить оценку максимальной входной энергии.

Весомый вклад в развитие энергетического метода принадлежит Ц.М. Уанг и В.В. Бертеро (С.М. Uang and V.V. Bertero), которыми были рассмотрены понятия относительной и абсолютной входной энергии. Их работа продемонстрировала важность абсолютной входной энергии. С тех пор интерес к использованию энергетического метода для оценки сейсмической опасности и сейсмического проектирования заметно увеличился. Это привело к созданию понятия спектра энергии: Ц.Ц. Чоу и Ц.М. Уанг (С.С. Chou and С.М. Uang), Н.Н Амбрасеи (N.N Ambrasey and J. Douglas), Л. Десанини и Ф. Моллайоли (L. Decanini and F. Mollaioli), А. Бенавент–Клемента и др. (A. Benavent–Clement *et al.*), Г.Г. Амири и др. (G.G Amiri *et al.*) и различных подходов к оценке входной энергии в системе с одной степенью свободы: Ци.Ци. Чоу и Ци.М. Уанг (С.С. Chou and С.М. Uang), П. Кхашай и др. (P. Khashaee *et al.*), А. Теран-Гилмор и Дж.О. Джрса (A. Teran-Gilmore and J.O. Jirsa), Е. Калкан (E. Kalkan), Р. Риддел и Е.Дж. Гарсия (R. Riddell and E. J. Garcia), Е. Калкан и С.К. Куннат (E. Kalkan and S.K. Kunnath).

В России развитию энергетического подхода к оценке сейсмостойкости посвящены работы Ю.Л. Рутмана, А.А. Петрова, А.М. Уздина, М.А. Клячко, А.А. Долгой.

Целью работы является разработка метода расчета сейсмостойкости зданий и сооружений на основе энергетических критериев интенсивности землетрясения.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих методов оценки входной энергии, поступившей в сооружение в результате сейсмического воздействия.
2. Проведение сравнительного анализа оценок сейсмической энергии с точным значением энергии, поступившей в систему с одной степенью свободы.
3. Разработка математической формулы для оценки величины максимальной сейсмической энергии, поступившей в систему при землетрясении.
4. Разработка алгоритма расчета сейсмостойкости сооружения на основе оценки входной сейсмической энергии.
5. Проведение расчетов с целью проверки эффективности применения предложенной формулы и алгоритмов.
6. Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов для расчета сейсмостойкости сооружения на примере многоэтажной каркасной рамы.

Объект исследования: Многоэтажные каркасные здания (стальные конструкции).

Предмет исследования: Входная сейсмическая энергии, поступившая в систему, и расчет сейсмостойкости рамных конструкций на максимальную расчетную энергию с учетом их пластического ресурса.

Основная научная гипотеза: Основная научная гипотеза заключалась в допущении, что поступившую в сооружение сейсмическую гистерезисную энергию можно адекватно оценить, моделируя сооружение упругопластической системой с одной степенью свободы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Установлено, что существующие способы расчета входной сейсмической энергии часто неконсервативные, что может привести к недооценке нужного пластического ресурса и переоценке сейсмостойкости сооружения.

2. Получена новая консервативная формула для оценки входной сейсмической энергии, поступившей в сооружения во время землетрясения.

3. Установлена связь полученной формулы с удельной плотностью энергии сейсмического воздействия, что позволяет определить максимальную входную энергию, минуя динамические расчеты.

4. Доказано, что новая формула позволяет разумно консервативно оценить энергию, поступившую в систему, с 1,5–2-х кратным запасом для систем, у которых период упругих колебаний $0.2c < T < 1c$ и отношение усилия пластического срабатывания к максимуму сейсмической нагрузки $\lambda = 0.125 - 0.25$.

5. Установлена связь между энергоемкостью сооружения и его максимальными перемещениями.

6. Разработан метод, устанавливающий связь между оценкой входной энергии и максимальными деформациями в структурных элементах несущей конструкции.

7. Разработана формула, устанавливающая связь между суммарными циклическими перемещениями и критерием малоциклового усталости.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что:

1. Получена новая формула для оценки сейсмостойкости сооружения с небольшим запасом входной сейсмической энергии.

2. Разработан метод расчета сейсмостойкости сооружения на основе оценки входной сейсмической энергии.

3. Получены новые формулы, связывающие суммарные циклические перемещения с критерием малоциклового усталости.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что разработанные аналитические зависимости позволяют выбрать проектные параметры, обеспечивающие сейсмостойкость сооружения, на начальной стадии проекта, минуя многочисленные прямые динамические расчеты.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использовались современные вычислительные программные комплексы, теория сейсмостойкости, общепринятые допущения строительной механики, теории упругости и теории пластичности, апробированные исследования других авторов по данному направлению.

Положения, выносимые на защиту:

1. Доказательство неконсервативности существующих методов расчета входной сейсмической энергии, поступившей в сооружения во время землетрясения

2. Новая формула для оценки входной сейсмической энергии.

3. Связь полученной формулы с удельной плотностью энергии сейсмического воздействия.

4. Доказательство того, что новая формула позволяет разумно консервативно оценить энергию, поступившую в систему, с 1,5–2-х кратным запасом для систем, у которых период упругих колебаний $0.2c < T < 1c$ и отношение усилия пластического срабатывания к максимуму сейсмической нагрузки $\lambda = 0.125 - 0.25$

5. Связь между энергоемкостью сооружения и его максимальными перемещениями (Формула для оценки максимальных перемещений сооружения).

6. Метод, устанавливающий связь между оценкой входной энергии и максимальными деформациями в структурных элементах несущей конструкции.

7. Формула, устанавливающая связь между суммарными циклическими перемещениями и критерием малоциклового усталости.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика, пункт 4 «Численные методы расчёта сооружений и их элементов»; пункт 7 «Теория и методы расчёта сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы, и т. д.).

Степень достоверности.

Все теоретические результаты работы получены в результате исследований на базе математического анализа, теории дифференциальных уравнений, теории колебаний, строительной механики, теории пластичности, теории предельного равновесия. Численный анализ был выполнен в результате ряда компьютерных решений с использованием сертифицированных компьютерных программ.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертационного исследования представлены в докладах и одобрены на следующих конференциях и семинарах:

1. Научно-технический семинар секции строительной механики «Актуальные проблемы автоматизации строительного проектирования», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 19-21 марта 2014.

2. Научно-технический семинар секции строительной механики «Санкт-Петербургского Дома Ученых РАН РФ», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 12 ноября 2014.

3. Научно-технический семинар секции строительной механики «Актуальные проблемы автоматизации строительного проектирования», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 25-27 марта 2015.

4. 68-я Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 15-17 апреля 2015.

5. Научно-технический семинар «Сейсмостойкое строительство», Санкт-Петербург, ПГУПС, 28 мая 2015.

6. XXV Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 29–30 сентября 2015.

7. 69-я Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 6–8 апреля 2016.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах общим объемом 3.06 п. л., лично автору принадлежат 2.31 п. л., из них 3 статьи в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 118 страниц печатного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 198 источников, в том числе 128 на иностранном языке. В работе представлено 28 рисунков, 12 таблиц и 76 формул.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, дана оценка научной и практической значимости диссертационной работы.

В первой главе представлен краткий обзор развития теории сейсмостойкости и методик определения входной сейсмической энергии.

Во второй главе проведено сопоставление существующих методов оценок входной сейсмической энергии. Также представлен сравнительный анализ входной энергии, поступившей в упругопластическую систему с одной степенью свободы, полученной по разным расчетным формулам.

В третьей главе предложены методики для определения входной сейсмической энергии при использовании удельной плотности энергии (*specific energy density*). Оценена энергия, поступившая в упругопластическую модель с одной степенью свободы. Произведено сравнение предложенной методики с другими энергетическими методами.

В четвертой главе рассмотрена связь между входной сейсмической энергией и максимальными деформациями в структурных элементах. Предложен метод оценки суммарных пластических деформаций в структурных элементах при малоцикловом нагружении многоэтажной плоской рамы.

В пятой главе рассматривается механизм разрушения системы и определена (на основе метода предельного равновесия) предельная сейсмическая нагрузка, учитывающая вес конструкции.

В заключении изложены основные итоги выполненного исследования, сделаны предложения о возможных направлениях продолжения исследований.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Установлена неконсервативность существующих методов расчета входной сейсмической энергии, поступившей в сооружения во время землетрясения

Для анализа упругопластической работы конструкций была использована нелинейная модель с одной степенью свободы (рис. 1), которую применяли в работах Н. Ньюмарк и Э. Розенблюэт, В. Д. Ивен, А. К. Чопра, Э. Симборт и другие ученые. Характер разгрузки данной модели описывается гипотезой кинематического упрочнения Мазинга.

Динамика упругопластической системы с одной степенью свободы (SDOF) описывается дифференциальным уравнением:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + F(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g, \quad (1)$$

где m – масса системы, c – коэффициент затухания, F – восстанавливающая сила, u – относительное перемещение массы, \dot{u} – скорость массы относительно основания, \ddot{u} – ускорение массы относительно основания, \ddot{u}_g – ускорение грунта, t – время.

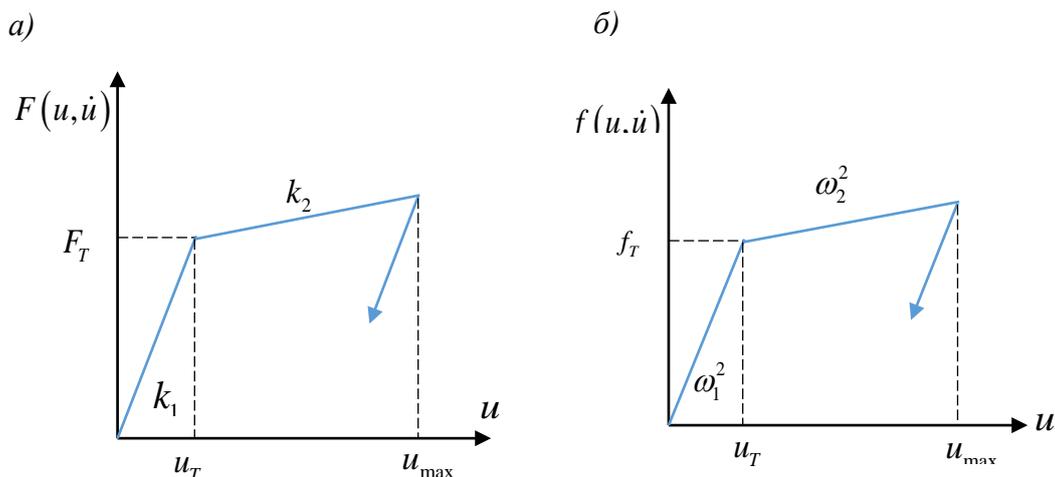


Рисунок 1 – Билинейная диаграмма с упругой разгрузкой:
а) для общей массы, б) для единичной массы

При деления всех слагаемых на масса m уравнение (1) можно записать в виде:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + f(u, \dot{u}) = -\ddot{u}_g, \quad (2)$$

где ξ – безразмерный коэффициент демпфирования, ω – собственная частота системы, $f(u, \dot{u})$ – приведенное к единичной массе усилие сопротивления.

Уравнению (1) соответствует энергетическое соотношение

$$E_K + E_\xi + E_A = E_I, \quad (3)$$

где $E_K = \int_0^t \dot{u}(t) d\dot{u} = \frac{1}{2}\dot{u}^2$ – относительная кинетическая энергия, $E_\xi = \int_0^t c\dot{u}^2 dt$ – энергия демпфирования, $E_A = E_S + E_H = \int_0^t F(u, \dot{u})\dot{u} dt$: E_H – энергия, рассеянная посредством пластических деформаций (невозвратимая гистерезисная энергия), $E_S = [f(u, u)]^2 / 2k = ku^2 / 2$ – потенциальная энергия упругой деформации, $k = k_1$ – начальная жесткость упругопластической системы (или частотная характеристика на начальном участке упругопластической системы), $E_I = -\int_0^t \ddot{u}_g \dot{u} dt$ – относительная входная энергия.

Левая часть соотношения (3) выражает «способность поглощения энергии» (*Energy Absorption Capacity – EAC*), а правая часть уравнения представляет входную энергию, полученную сооружением вследствие землетрясения. Сейсмическую безопасность конструкции можно оценить, сравнив ожидаемое значение E_I на участке, где расположено здание, с предельным значением *EAC*.

В настоящее время предложены различные энергетические подходы к определению сейсмических нагрузок. Основные составляющие данных подхо-

дов – оценка поступающей в систему энергии и распределение этой энергии по несущим элементам системы. Некоторые методы определения входной энергии:

Оценка Хаузнера (*Housner*)

$$E_I/m = 1/2 (PSV)^2 = EPSV, \quad (4)$$

где PSV псевдоспектральная скорость.

Оценка Акияма (*Akiyama*)

$$\frac{E_I}{m} = \frac{1}{2} (V_E)^2 = E_{AK}; \quad V_E = \begin{cases} 2.5T & \text{для } T \leq T_G \\ 2.5T_G & \text{для } T \geq T_G \end{cases}. \quad (5)$$

Оценка Кувамура и Галамбос (*Kuwamura and Galambos*)

$$\frac{E_I}{m} = 1/2 (V_E)^2 = EKG;, \quad (6)$$

$$V_E = 0.5\sqrt{T_G I_E} \text{ для } T \geq T_G \text{ и } 0.5\sqrt{I_E/T_G} T \text{ для } T \leq T_G$$

где V_E – эквивалентная скорость, $I_E = \int_0^t \ddot{u}_g^2 dt$ – ускорения основания за время, соответствующее общей продолжительности акселерограммы (t), T – период системы, T_G – преобладающий период движения основания как функция типа почвы, который равен 0.4, 0.6, 0.8 и 1.0с для почвы I (коренная порода), II, III, и IV (самый мягкий грунт), соответственно.

Оценка Ариаса (*Arias*)

$$\frac{E_I}{m} = \frac{(I_A)^2}{2} = EIA, \quad (7)$$

где $I_A = \pi/2g \int_0^t \ddot{u}_g^2 dt$ – модифицированная интенсивность Ариаса, g – ускорение свободного падения, t – общая продолжительность движения грунта.

Оценка Рутмана

$$E(t)_B \leq \frac{m(CAV)^2}{2} = ECAV, \quad (8)$$

где $E(t)_B$ – поступившая в систему сейсмическая энергия, $CAV = \int_0^t |\ddot{X}(\xi)| d\xi$ –

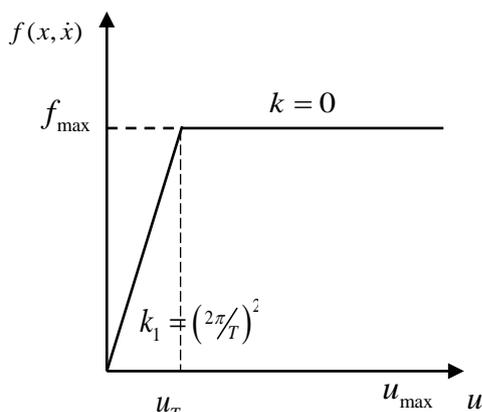


Рисунок 2 – Силовая упругопластическая характеристика

кумулятивная абсолютная скорость, \ddot{X} – ускорение грунта.

Для упругопластических систем с одной степенью свободы, к описанию которой можно применить уравнение (3), были произведены динамические расчеты в программе «*NONLIN*» для определения максимальных входных энергий (E_I), поступающих в систему при сейсмических воздействиях. Результаты сравнили с результатами, полученными по формулам (4), (5), (6), (7) и (8).

Силовая упругопластическая характеристика системы взята в виде диаграммы Прандтля (рис. 2). Рассматриваемые системы с 5% демпфированием имеют период T от 0,02 до 2с. Воздействия были заданы в виде акселерограмм (табл. 1). В расчет принималась предельная сила (f_{max}), равная максимуму пикового ускорения основания.

Таблица 1 – Характеристики используемых акселерограмм

Название	Страна и дата	Станция	компонент	(M_w)	PGA (м/с ²)	t_{td} (с)	t_{sd} (с)
ChiChi*	Taiwan, 1999	CHY101	N	7,6	4.32	90	26.49
Friuli*	Italy, 1976	Tolmozz	0°	6,5	3.44	36,34	4.24
Kobe*	Japan, 1995	Nishi-Akashi	0°	6,9	4.99	40,95	9.73
Kocaeli**	Turkey, 1999	Duzce	270°	7,5	3.51	27,18	10.56
Northridge*	USA, 1994	LA- Sepulveda VA Hospital	360°	6,7	9.16	47,77	8.53
AnoLiosia**	Greece, 1999	Athens 3 (Kallithea District) – Greece	N136	6,0	3.01	39,04	4.41
Ano Liosia	Greece, 1999	Athens-Sepolia (Metro Station) – Greece	Long	6,0	2,38	45,98	3.86
Avej**	Iran, 2002	Avaj (Bakhshdari) – Iran	Long	6,5	4,37	58,86	6
Kozani**	Greece, 1995	Kozani-Prefecture – Greece	Horz	6,5	2,04	29,36	6.46
Montenegro**	Serbia & Mont., 1979	Veliki Ston-F-Ka Soli – Coratia	Horz	6,9	2,62	29,2	9.95
Loma Prieta*	1989	Oakland Outer Harbor Wharf	270°	6,9	2,7	40	7,8
San Fernando*	1971	Cholame Shandon	40°	6.6	2.33	26.2	13,8

Полученные оценки максимальной энергии, поступившей в систему, (сплошными линиями на рис. 3) отличаются друг от друга, что отражает использованием авторами разных параметров и допущений. В ряде случаев полученные оценки максимальной сейсмической энергии занижены по отношению к реальным значениям (EI), что может привести к недооценке нужного пластического ресурса и сейсмостойкости сооружения.

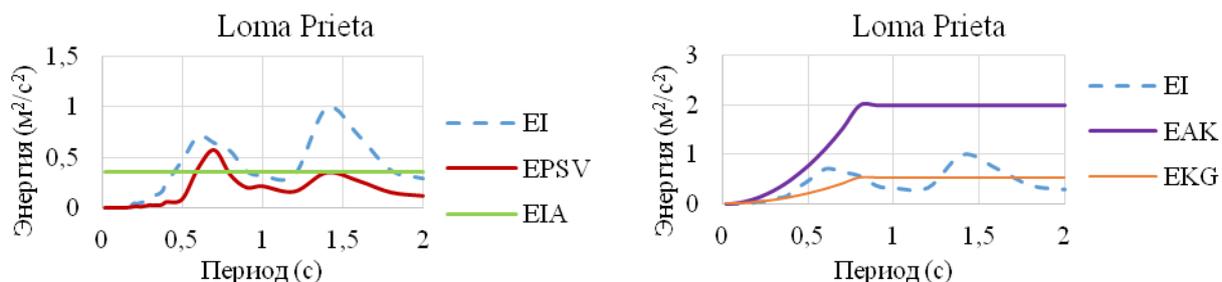
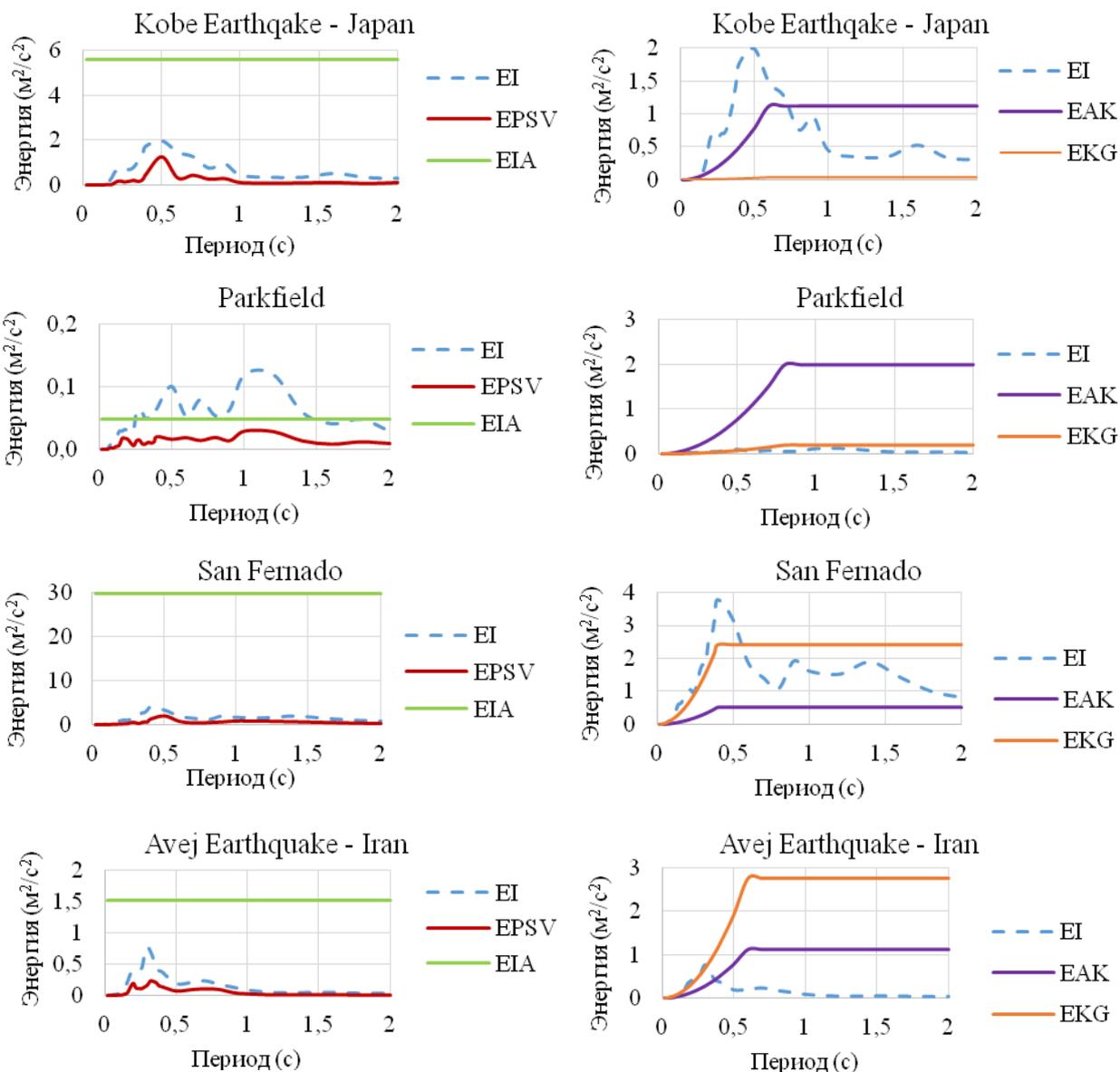


Рисунок 3 (начало) – Сейсмическая энергия, поступавшая в различные системы на воздействие землетрясения: EI , $EPSV$, EIA , EAK , EKG – максимальная энергия по (3), (4), (5), (6) и (7)



Рисунки 3 (окончание) – Сейсмическая энергия, поступающая в различные системы на воздействие землетрясения: *EI*, *EPSV*, *EIA*, *EAK*, *EKG* – максимальная энергия по (3), (4), (5), (6) и (7)

2. Получена новая формула для оценки входной сейсмической энергии, поступившей в сооружения во время землетрясения.

Исходя из вышеизложенных фактов, был произведен поиск нового метода, позволяющего оценить максимальную входную сейсмическую энергию, поступившую в систему при землетрясениях, без занижения необходимого для сейсмостойкости сооружения пластического ресурса.

Численный анализ показывает, что в уравнении (3) членом $E_{\xi} = \int_0^t c\dot{u}^2 dt$ можно пренебречь вследствие его малости. Основным интерес представляет диссипативная энергия, являющаяся монотонно возрастающей функцией. Именно эта энергия приводит к разрушению системы в условиях ее пластического деформирования. Вследствие монотонности E_A оценку максимума этой энергии следует производить в конце процесса сейсмического воздействия или в конце интенсивной фазы (\bar{t}) воздействия. Получим оценку исходя из предпо-

ложения, что $k_2 = 0$ (рис. 1), т.е. для случая, когда предельная сила сопротивления сооружения $F(u, \dot{u})$ описывается диаграммой Прандтля. При этом учтем, что $\dot{u}_g(\bar{t}) = 0$; $\dot{u}_g(0) = 0$.

Проинтегрируем $\int_0^{\bar{t}} \ddot{u}_g \dot{u}_g dt$ по частям:

$$\int_0^{\bar{t}} \ddot{u}_g \dot{u}_g dt = \dot{u}_g \dot{u}_g \Big|_0^{\bar{t}} - \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g \ddot{u}_g dt = - \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g \ddot{u}_g dt. \quad (9)$$

Пренебрегая вязким демпфированием, из (2) следует:

$$\ddot{u} = -f(u, \dot{u}) - \ddot{u}_g. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), получим

$$\begin{aligned} \int_0^{\bar{t}} \ddot{u}_g \dot{u}_g dt &= \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g (f(u, \dot{u}) + \ddot{u}_g(t)) dt = \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g \ddot{u}_g dt + \int_0^{\bar{t}} f(u, \dot{u}) \dot{u}_g dt \\ &= \frac{\dot{u}_g^2}{2} \Big|_0^{\bar{t}} + \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g f(u, \dot{u}) dt = \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g f(u, \dot{u}) dt \end{aligned} \quad (11)$$

Учтем, что $\dot{u}_g(\bar{t}) = 0$, тогда с учетом (11) из (3) получаем:

$$E_A \leq \int_0^{\bar{t}} |\ddot{u}_g \dot{u}_g| dt = \int_0^{\bar{t}} |\dot{u}_g f(u, \dot{u})| dt. \quad (12)$$

Введем обозначения:

$$|f(u, \dot{u})| = f. \quad (13)$$

Используя неравенство Коши-Буняковского, из (12) находим оценку:

$$E_A \leq f_{\max} \sqrt{\bar{t} \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g^2 dt}, \quad (14)$$

где f_{\max} – предельная сила, \bar{t} – существенная продолжительность сейсмического воздействия.

3. Установлена связь полученной формулы с удельной плотностью энергии сейсмического воздействия, что позволяет определить максимальную входную энергию, при любых землетрясениях минуя динамические расчеты.

$$E_A \leq f_{\max} \sqrt{\bar{t} \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g^2 dt} = f_{\max} \sqrt{\bar{t} SED} = ESED, \quad (15)$$

где E_A – поглощенная энергии, f_{\max} – предельная сила, $SED = \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g^2 dt$ – удельная плотность энергии сейсмического воздействия ($\text{м}^2/\text{с}$).

Выражение (15) позволяет установить максимальную сейсмическую энергию, поступившую в сооружение, зная SED и кривую несущей способности сооружения. Такая оценка производится вне рамок динамического расчета и без учета спектральных характеристик сооружения.

4. Доказано, что новая формула позволяет разумно консервативно оценить энергию, поступившую в систему, с 1,5 – 2-х кратным запасом для

систем, у которых период упругих колебаний $0.2c < T < 1c$ и отношение усилия пластического срабатывания к максимуму сейсмической нагрузки $\lambda = 0.125 - 0.25$.

В настоящее время сейсмостойкое проектирование зданий основано на силовом расчете и представлении эффекта землетрясения статическими эквивалентными силами, которые рассчитываются, используя упругие спектры реакции (линейно-спектральный метод – ЛСМ), связывающие пиковое ускорение грунта (PGA) с абсолютным ускорением (рисунок 4).

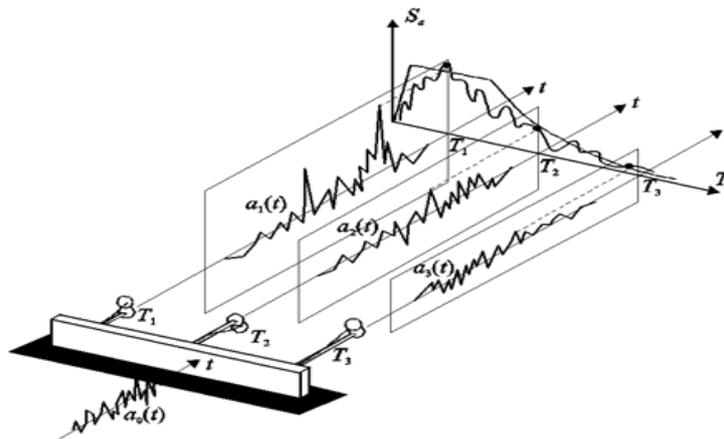


Рисунок 4 – Схема сейсмических колебаний грунта и спектр отклика

Такой подход не учитывает ни влияния длительности сильных движений, ни пластического поведения конструкции.

Одним из недостатков использования спектров реакции является невозможность в некоторых случаях отличить записи с явно различными характеристиками. Например, две записи землетрясений в Чили (1985) и Сан-Сальвадор (1986) имеют разные пиковые ускорения грунта, частотный состав и длительность. Однако упругие спектры реакции, полученные для этих землетрясений, трудно отличить (рис. 5).

В отличие от спектров реакции спектральные значения входной энергии (рис. 6) демонстрируют различие между двумя землетрясениями, таким образом, показывая возможный потенциал повреждения от землетрясений, что является преимуществом энергетического метода.

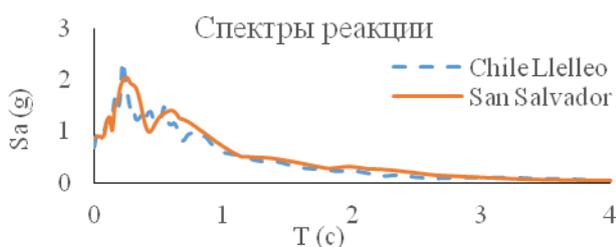


Рисунок 5 – Упругие спектры реакции для записей землетрясений Чили и Сан-Сальвадор

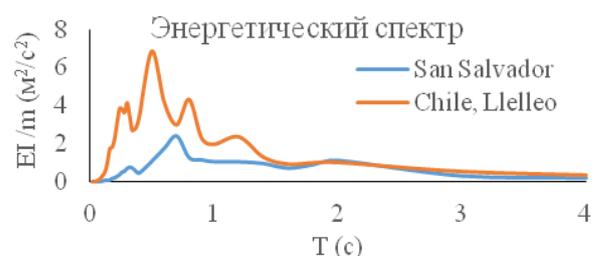


Рисунок 6 – Упругие входные энергетические спектры записей землетрясения Чили и Сан-Сальвадор

Обеспечение пластического ресурса сооружения должно основываться на правильном определении входной энергии в систему, что очень важно на начальном этапе проектирования.

Для сейсмических воздействий, приведенных в табл. 1, были проведены динамические расчеты SDOF системы (1) на интервале времени, соответствующем интенсивной фазе движения грунта (рис. 7) с целью определения входной энергии (E_I) и поглощенной энергии (E_A). Для этих же воздействий были определены значения SED . С помощью этих данных находилась оценка входной энергии по (15). Основные периоды T принимались от 0.02 до 2с. Максимальное предельное ускорение определялось как: $f_{max} = \lambda_i PGA$, где PGA – пиковое ускорение грунта, λ – множитель равным 1, 0.75, 0.5, 0.25 и 0.125.

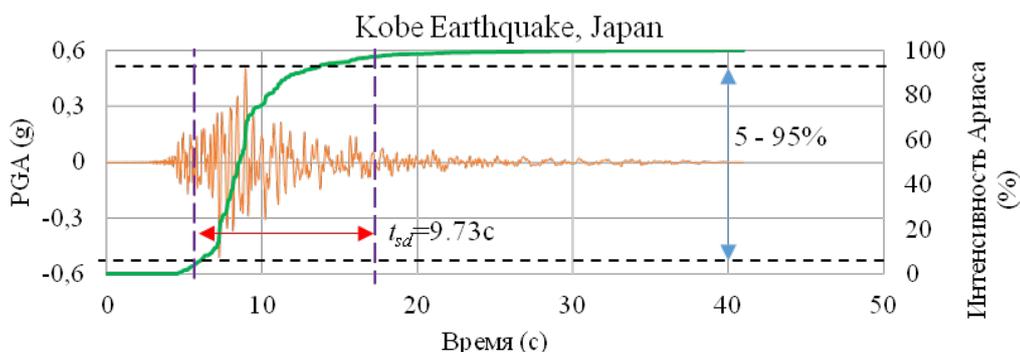


Рисунок 7 – Интервал сильного движения на примере записи землетрясений кобе, Юпония

На основе полученных результатов строились графики для сравнения энергий, полученных в результате точного решения динамической задачи (1), с предлагаемой оценкой этих энергий (15). Характерные графики приведены на рис. 8 и 9а–д. Окончательные результаты сравнительных соотношений E_{SED}/E_A для анализируемых воздействий имеет вид рис. 9е.

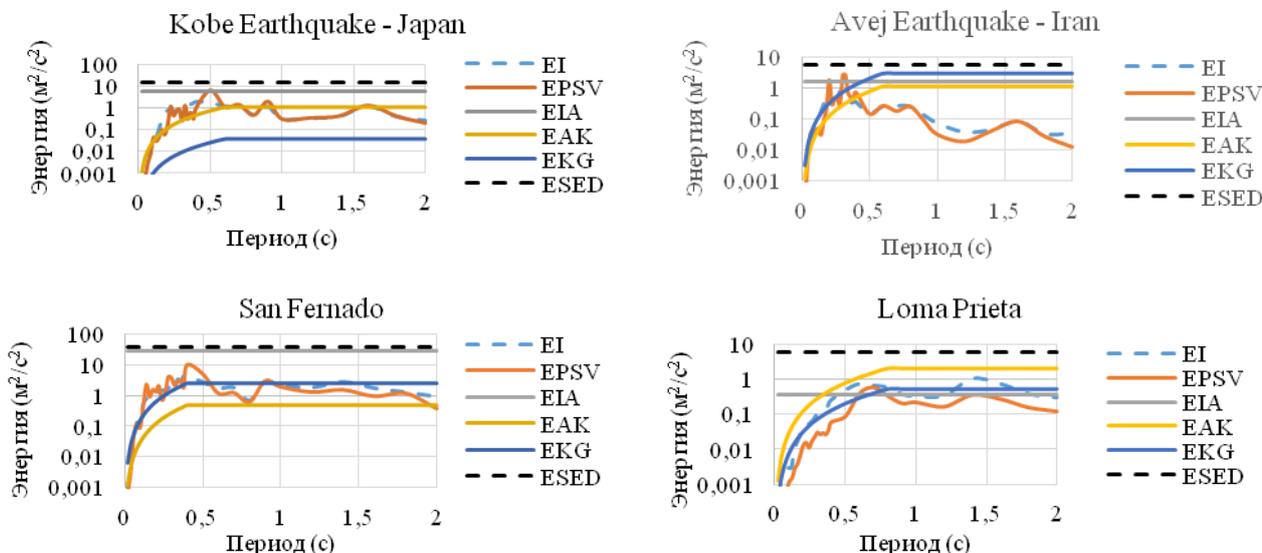


Рисунок 8 – Сейсмическая энергия, поступающая в упругопластическую систему с одной степенью свободы. Точные значения и оценка (15)

Kobe Earthquake

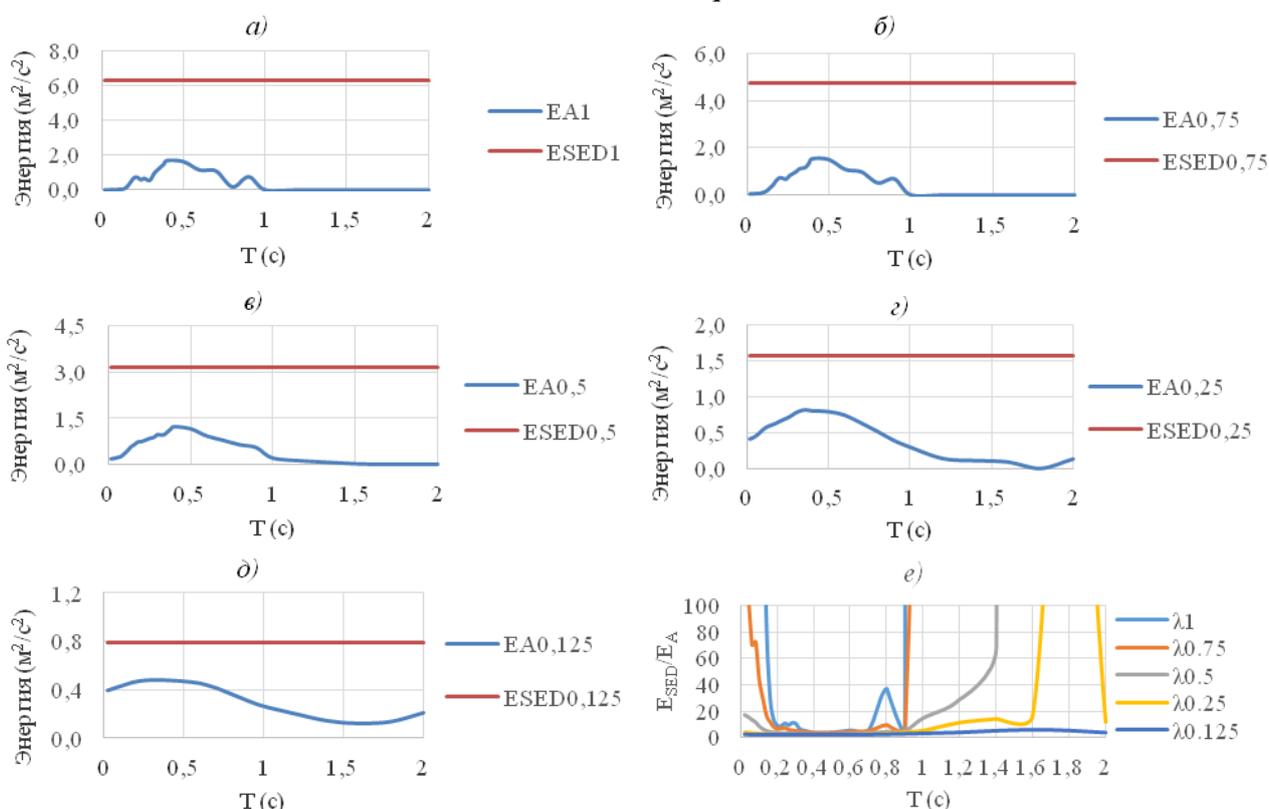


Рисунок 9– (а–д) Сейсмическая энергия, поступившая в систему при различных значениях λ_i , е) соотношения между E_{SED} и E_A

E_{Ai} – энергия по формуле (3), E_{SEDi} – по формуле (15)

Анализ результатов, представленных на рис. 8 и 9, показывает, что

- для упругопластических систем с одной степенью свободы оценка (15) всегда выше действительного значения гистерезисной энергии системы. Это обстоятельство выгодно отличает предлагаемую оценку от Хаузнера (Housner), Акиямы (Akiyama), Кувамуры и Галамбоса (Kuwamura and Galambos) и Ариаса (Arias), которые могут дать заниженное значение энергии (рис. 8).

- полученная новая формула позволяет оценить энергию, поступившую в систему, в среднем с 1,5-2-х кратным запасом (рис. 9, е) для систем, у которых $0.2\text{c} < T < 1\text{c}$ ($1 < f < 5$ Гц) при $\lambda = 0.125 - 0.25$, что является разумно консервативной оценкой.

5. Установлена связь между энергоемкостью сооружения и его максимальными перемещениями.

Если силовая упругопластическая характеристика системы описывается диаграммой Прандтля, то поступившую в систему сейсмическую энергию можно оценить сверху по формуле (15).

Из (15) следует, что \sqrt{tSED} – суммарное перемещение системы с одной степенью свободы. Это суммарное перемещение складывается из линейного суммирования перемещений на отдельных этапах циклического деформирования.

Циклические перемещения системы с одной степенью свободы графически можно представить диаграммой, изображенной на рисунок 10.

Следуя обозначениям рисунка 10, получаем:

$$E_A = f_{\max} \sum_{i=1}^n |\Delta_i|. \quad (16)$$

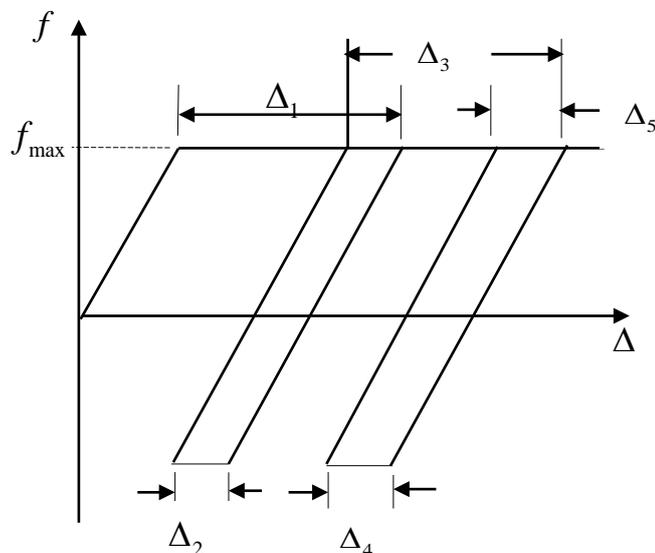


Рисунок 10 – Циклическая диаграмма деформирования

Из (15) и (16) получаем:

$$f_{\max} \sum_{i=1}^n |\Delta_i| \leq f_{\max} \sqrt{tSED}. \quad (17)$$

Таким образом,

$$\sum_{i=1}^n |\Delta_i| \leq \sqrt{tSED}. \quad (18)$$

Левую часть неравенства (18) следует рассматривать (в рамках сделанных выше предпосылок по использованию модели с одной степенью свободы) как суммарные циклические перемещения верха сооружения. Соотношение (18) позволяет установить возможность малоциклового разрушения, если установить связь между перемещениями и деформациями.

6. Разработан метод, устанавливающий связь между оценкой входной энергии и максимальными деформациями в структурных элементах несущей конструкции.

Обычно несущую конструкцию сооружения можно представить многоэтажной рамой. Пластический ресурс конструкции можно учесть, проведя ее расчет методом предельного равновесия. Установив места расположения пластических шарниров, образовавшихся под действием предельной нагрузки, можно, следуя рекомендациям Э. Симборта, свести расчетный анализ к расчету консольных балок. Для этого нужно геометрически связать перемещения верха сооружения с перемещениями эквивалентных консольных балок. Затем по пе-

ремещениям эквивалентных консолей находятся максимальные деформации в нижних контурах рамы, в которых образовались пластические шарниры.

Для упрощения расчетов за пределом упругости кривые деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$ схематизируют. Распространенный вариант такой схематизации степенная зависимость между напряжениями и деформациями:

$$\sigma = \bar{B}_1 |\varepsilon|^\mu \varepsilon, \quad (19)$$

где σ – напряжение, ε – деформация, \bar{B}_1 – параметр, характерный для рассматриваемой стали, μ – показатель деформационного упрочнения, $\bar{B}_1 > 0$ и $\mu \leq 1$ – постоянные.

Степенной закон деформирования приводит к соотношению:

$$\bar{B}_1 J_{o\sigma} |\chi|^{\mu-1} \chi = -M, \quad (20)$$

где $\chi = \frac{d^2 v}{dx^2}$ – кривизна балки, $J_{o\sigma}$ – обобщенный момент инерции.

Пластический прогиб для консольной балки определяется следующим образом:

$$\Delta = \frac{P^\eta l^{2+\eta}}{(2+\eta)D}, \quad (21)$$

где $\eta = \frac{1}{\mu}$, $D = \bar{B}_1^\eta J_{o\sigma}^\eta$, P – сила на конце консоли, l – длина балки.

Следовательно,

$$\Delta = \frac{M^\eta l^2}{(2+\eta)D} = \frac{\left[\bar{B}_1 J_{o\sigma} \left(\frac{\varepsilon}{h} \right)^\mu \right]^\eta l^2}{(2+\eta)D} = \frac{\bar{B}_1^\eta J_{o\sigma}^\eta \frac{\varepsilon}{h} l^2}{(2+\eta) \bar{B}_1^\eta J_{o\sigma}^\eta} = \frac{\varepsilon l^2}{h(2+\eta)}, \quad (22)$$

Откуда

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{l^2} (\eta + 2), \quad (23)$$

где h – высота сечения балки.

Полученную формулу (23) для консольного стержня можно использовать для определения максимальных пластических деформаций в элементах строительных конструкций, в частности, в элементах каркасных зданий.

Определив места образования пластических шарниров (рис. 11, а), следует геометрически связать перемещение верха сооружения (установленное по оценке входной сейсмической энергии) с перемещениями эквивалентных консольных балок (рис. 11, б). Затем по приведенной выше формуле находятся максимальные деформации в каркасе.

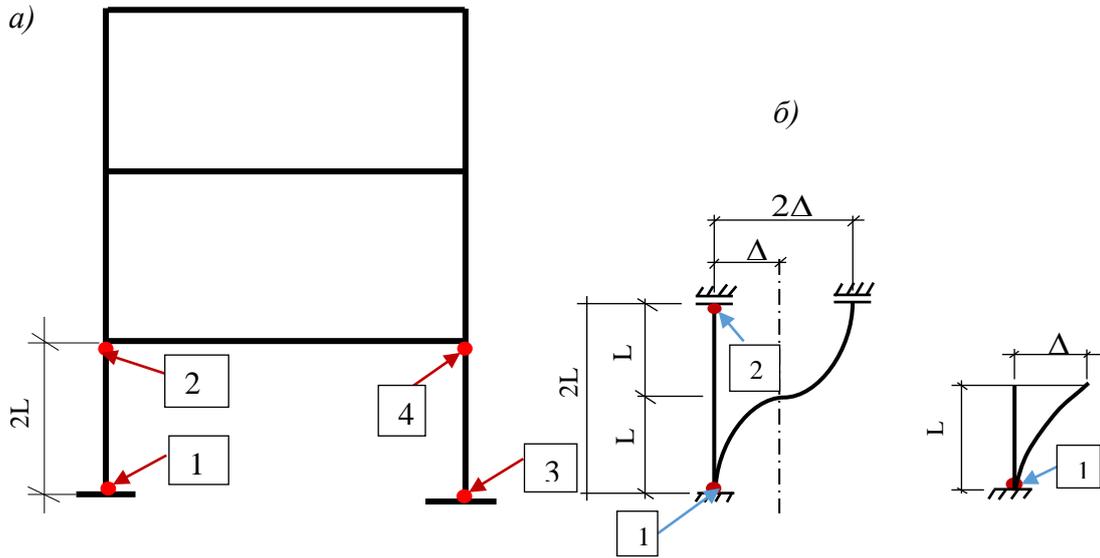


Рисунок 11 – Переход от рамы к эквивалентной консоли:
 а) места образования пластических шарниров, б) схема эквивалентной консоли

Места образования пластических шарниров можно найти, проводя расчет предельного равновесия при горизонтальной нагрузке пропорциональной распределенной массе системы методом псевдожесткостей предложенным Ю. Л. Рутманом и реализованным в ПК «Ing+».

7. Разработана формула, устанавливающая связь между суммарными циклическими перемещениями и критерием малоциклового усталости.

При сейсмических воздействиях перемещения и соответственно деформации имеют знакопеременный характер. Поэтому надо применять критерий малоциклового усталости, так как уровень повреждений строительных конструкций в результате сейсмического воздействия зависит не только от максимального динамического перемещения, но и от накопленных повреждений в результате многочисленных циклов упругопластического деформирования.

Для циклов с разной амплитудой удобно использовать, основанный на критерии Коффина-Мэнсона, критерий Мартина:

$$\sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_i^2 \leq \varepsilon_B^2 \quad \text{или} \quad 2 \sum_{i=1}^N \Delta \varepsilon_i^2 \leq \varepsilon_B^2, \quad (24)$$

где ε_B – разрывная деформация, n – число полуциклов, N – число циклов нагружения.

Если все циклы одинаковы, то

$$N \Delta \varepsilon_i^2 \leq \frac{1}{2} \varepsilon_B^2 \quad \Rightarrow \quad N^{\frac{1}{2}} \Delta \varepsilon_i \leq \frac{\varepsilon_B}{\sqrt{2}}. \quad (25)$$

Для разных амплитуд циклов критерий неразрушимости, при упругопластическом циклическом нагружении, можно привести к виду:

$$\sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_i^2 \leq \left[\sum_{i=1}^n |\Delta \varepsilon_i| \right]^2 \leq \varepsilon_B^2. \quad (26)$$

Из (26) получаем усиленное условие неразрушимости:

$$\sum_{i=1}^n |\Delta \varepsilon_i| \leq \varepsilon_B. \quad (27)$$

Применяя критерий (27) к вышеизложенной методике расчета эквивалентных консольных балок (23) и используя оценку (18), получаем

$$|\varepsilon_i| = \frac{\Delta_i h}{l^2} (\eta + 2), \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i h}{l^2} (\eta + 2) \leq \frac{h}{l^2} (\eta + 2) \sqrt{tSED} \leq \varepsilon_B. \quad (29)$$

Формулу (29) можно применять как критерий неразрушимости, основанный на оценке входной энергии при упругопластическом нагружении сооружения при землетрясении.

8. Возможности предложенного метода были показаны на примере расчета многоэтажной плоской рамы.

Исходные данные для расчета являются воздействиями в виде записей землетрясения (табл. 2) при

$$h = 0.4 \text{ м}, l = 3.5 \text{ м}, \eta = 5, \varepsilon_B = 0.2, \sqrt{tSED} = E_{SED} / f_{\max}, f_{\max} = \lambda A_{\max}, \lambda = 0.25$$

Результаты, представленные в табл. 3, указывают на то, что для воздействий 2-10 деформации в системе находятся в допустимых пределах. Однако для первого воздействия деформация превышает допустимое значение. Это означает, что для обеспечения сейсмостойкости системы необходимо внести корректировки в первоначальные проектные данные.

Таблица 2 – Характеристики записи землетрясений

№	Землетрясение	PGA (м/с ²)	SED (м ² /с)	Продолжительность, t (с)
1.	Chi-chi	4.32	2.442	26.49
2.	Friuli	3.43	0.025	4.24
3.	Kobe	5.00	0.164	9.73
4.	Kacaeli	3.51	0.314	10.56
5.	Northridge	9.15	0.388	8.53
6.	Ano Liosia_K	3.01	0.007	4.41
7.	Ano Liosia_S	2.38	0.006	3.86
8.	Avej	4.37	0.024	6
9.	Kozani	2.04	0.005	6.46
10.	Montenegro	2.62	0.020	9.95

Таблица 3 – Циклическая деформация упругопластической системы с одной степенью свободы

№	Акселерограмм	$\sqrt{\tilde{t}SED}$ (м)	$\frac{h}{l^2}(\eta + 2)\sqrt{\tilde{t}SED}$	ε_B
1.	Chi-Chi	8.049	1.839	0.2
2.	Friuli	0.326	0.074	
3.	Kobe	1.259	0.288	
4.	Kocaeli	1.810	0.414	
5.	Northridge	1.827	0.417	
6.	Ano Liosia_K	0.174	0.040	
7.	Ano Liosia_S	0.153	0.035	
8.	Avej	0.385	0.088	
9.	Kozani	0.179	0.041	
10.	Montenegro	0.441	0.101	

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Существующие энергетические подходы к анализу сейсмостойкости сооружений не консервативные так как используют формулы, которые в ряде случаев уменьшают входную сейсмическую энергию.

2. Предложенная в диссертации оценка входной энергии дает разумный запас, завышая входную энергию в 1.5–2 раза. для систем, у которых период упругих колебаний $0.2c < T < 1c$.

3. Разработанный в главе 4 метод и представленные формулы позволяют связать величину входной энергии с деформациями в сооружении. При этом учитывается циклическое накопление деформаций.

4. Установлена связь между суммарными циклическими перемещениями и критерием малоциклового усталости.

5. Совокупность предложенных формул и методов позволяет оценить сейсмостойкость сооружения, минуя многочисленные динамические расчеты. Таким образом, предложенный подход является удобным инструментом для выбора основных проектных параметров на начальной стадии проектирования.

6. Проведенные исследования показали, что широкое применение энергетического метода к анализу сейсмостойкости сооружений требует его дальнейшего развития. В первую очередь, это касается разработки других (помимо предложенного) способов распределения сейсмической энергии между структурными элементами сооружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате выполненных исследований был развит энергетический метод оценки сейсмостойкости сооружений, позволяющий оценивать сейсмостойкость с разумным запасом, минуя прямые динамические расчеты.

2. Рекомендуется использовать этот метод на начальном этапе проектирования, что позволит избежать рассмотрения многочисленных вариантов не работоспособных несущих конструкций.

3. Дальнейшая разработка темы должна быть направлена на установление законов распределения входной энергии между различными структурными элементами сооружения.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, размещенные на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. **Шивуа, А. Дж.** Анализ энергетических методов оценки сейсмической энергии, поступившей в систему при землетрясении [Текст] / А. Дж. Шивуа // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. – 2014. – № 6 (47). – С. 96 – 103 (0.625 п.л.).

2. **Шивуа, А. Дж.** Оценки сейсмической энергии, поступившей в упруго-пластическую систему с одной степенью свободы [Текст] / Ю. Л. Рутман, А. Дж. Шивуа // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. – 2015. – № 2 (49). – С. 64 – 74 (0.75 / 0.375 п.л.).

3. **Шивуа, А. Дж.** Связь между циклической деформацией и сейсмической энергией, поступившей в сооружение [Текст] / А. Дж. Шивуа // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. – 2016. – № 2 (55). – С. 67 – 72 (0.625 п.л.).

Публикации в других изданиях:

4. **Shiwua, A. J.** The need for earthquake resistant structures in Nigeria [Текст] / A. J. Shiwua // International Journal of Engineering Inventions. – 2013. – Vol. 3, Issue 1, – Pp. 52 – 57 (0.3125 п.л.).

5. **Шивуа, А. Дж.** Энергетический метод оценки сейсмостойкости с помощью удельной энергетической плотности (УЭП) [Текст] / А. Дж. Шивуа, Ю. Л. Рутман // Актуальные проблемы современного строительства: Сборник докладов «68-я Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых». – СПбГАСУ. – 2015. – ч. I. – С. 6 – 11 (0.25 / 0.125 п.л.).

6. **Shiwua, A. J.** Effect of ground motion characteristics and structural properties on energy components of a structure [Текст] / S. M. Auta, A. J. Shiwua, T. Y. Tsado and J. Olayemi // Nigerian Journal of Engineering and Applied Sciences, Federal University of Technology, Minna, – 2016. – Vol. 2, No. 1, Pp. 168 – 176 (0.5 / 0.25 п.л.).