

На правах рукописи



ИВАНОВ Андрей Юрьевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКИХ
КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ**

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

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 «Механика и прочность
материалов и конструкций», профессор

Долгая Анжелика Александровна
кандидат технических наук,
АО «Трансмост», г. Санкт-Петербург,
сектор разработки программных средств,
инженер-проектировщик I категории

**Ведущая
организация:**

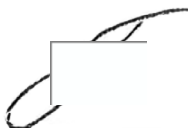
**ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»**

Защита диссертации состоится 16 февраля 2021 г. в 15³⁰ ч. 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 220).
Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: dissovetsgasu@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/ivanov-andrey-yurevich-0>.

Автореферат разослан 22 декабря 2020 года.

**Ученый секретарь
диссертационного совета:**



Попов Владимир Минович
кандидат технических наук,
доцент

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Непосредственной причиной гибели людей являются не землетрясения, а неправильно спроектированные здания, т.е. здания, сейсмостойкость которых оказалась недостаточна по отношению к произошедшему землетрясению. Сейсмостойкость зданий напрямую связана с размерами капиталовложений, выделяемыми на антисейсмические мероприятия. При этом стоимость любого проектируемого в сейсмически опасном районе объекта необходимо рассматривать на временном интервале, равном его сроку службы – жизненном цикле здания, т.к. помимо затрат на антисейсмические мероприятия на этапе строительства в течении жизненного цикла будут также возникать дополнительные затраты на ремонт и восстановление элементов здания, поврежденных при землетрясениях, т.е. будет возникать ущерб.

На сегодняшний день такой ущерб принято оценивать на основании статистических данных о повреждениях в зданиях типовой застройки, вызванных прошедшими землетрясениями. Однако для многих проектируемых в настоящее время сооружений такой подход неточен ввиду существенного отличия их объемно-планировочных решений от типовых, для которых такие статистические данные собраны. Поэтому требуется методика, которая позволит определять сейсмический ущерб для каждого конкретного здания, что можно сделать, связав результаты динамического расчета здания с финансовыми показателями ущерба. В диссертации предлагается алгоритм, устанавливающий эту связь. Этот алгоритм используется для инженерно-экономического анализа проектов по сейсмоусилению строительных сооружений и оптимизации их конструктивных решений по экономическому критерию. В экономии затрат на сейсмоусиление и заключается актуальность работы.

Степень разработанности темы исследования

Впервые проблему оптимизации конструктивных решений и прогнозирования экономического ущерба при сейсмических воздействиях сформулировали и предложили решение В.И. Кейлис-Борок, И.А. Нерсеров и А.М. Яглом в 1962 г., обозначив наиболее важные направления для дальнейших исследований в этой области. Задача экономической оптимизации конструктивных решений зданий и сооружений, обеспечивающих их требуемое поведение при экстремальных воздействиях (при сейсмических воздействиях, в частности), в дальнейшем широко рассматривалась в зарубежной литературе. В первую очередь, следует указать на работы Y.K. Wen, Y.J. Kang, K. Kinali, B.R. Ellingwood, A.S Whittaker, M. Kumar, N.D. Lagaros, M. Fragiadakis, M. Papadrakakis и другие. Проблемами, связанными с оценкой экономического эффекта при проектировании зданий в сейсмически опасных регионах России, занимались А.М. Уздин, О.А. Сахаров, К.С. Богданова, В.В. Сигидов.

Однако, в указанных работах финансовый ущерб от сейсмике определялся из абстрактных предположений. Задача связи финансового ущерба с дина-

мическими расчетами реальных зданий не была решена. Поэтому нельзя было оптимизировать конструктивные решения, исходя из критерия уменьшения затрат на антисейсмические мероприятия.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритма экономической оптимизации сейсмостойких конструктивных решений зданий и сооружений, проектируемых в сейсмически опасных районах.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих оптимизационных методик и алгоритмов. Постановка оптимизационной задачи, определение целевой функции и варьируемых параметров;

2. Разработка метода определения конструктивного ущерба в зданиях и сооружениях при землетрясении расчетным способом, основанном на использовании нелинейных методов строительной механики;

3. Разработка методики оценки несущей способности и податливости здания при действии возрастающей горизонтальной нагрузки, а также построения кривой несущей способности здания;

4. Разработка методики вероятностной оценки количества землетрясений различной интенсивности за жизненный цикл здания;

5. Применение полученного оптимизационного алгоритма для инженерно-экономического анализа на примере конкретных зданий.

Объект исследования – оптимизационный алгоритм, направленный на поиск наилучшего (с точки зрения выбранного критерия оптимизации – экономического эффекта) решения, т.е. оптимального способа сейсмоусиления здания.

Предмет исследования – зависимость целевой функции алгоритма оптимизации (экономического эффекта) от варьируемых параметров (сейсмического ущерба, как функции принятых конструктивных решений и др.) методы их определения, взаимосвязь между собой.

Научная новизна диссертационной работы

1. Предложен оптимизационный алгоритм, позволяющий произвести предварительный инженерно-экономический анализ объекта, проектируемого в сейсмически опасном районе с целью выявления наиболее оптимального варианта его сейсмоусиления;

2. Предложена расчетная методика определения ущерба при землетрясении, как одного из основных параметров, влияющих на значение целевой функции оптимизационной задачи. Установлена взаимосвязь экономического ущерба с результатами динамического расчета, получаемыми методами строительной механики;

3. Предложена методика построения кривой несущей способности здания, которая является основой для определения ущерба. Методика, в отличие от имеющихся в настоящее время рекомендаций и подходов, основывается на строгой оценке границ несущей способности здания;

4. Предложена методика определения количества землетрясений разной интенсивности за жизненный цикл здания.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в том, что предложено решение проблемы, связанной с оценкой предельной способности здания выдерживать горизонтальное воздействие (сейсмическое) и с оценкой предельной горизонтальной податливости. Кроме того, предложен способ определения количества воздействий за жизненный цикл здания на основе вероятностной модели.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработанные алгоритмы оптимизации на начальном этапе проектирования позволят проводить сравнение различных сейсмостойких конструктивных решений здания по заданному критерию с целью определения оптимального.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложен алгоритм оптимизации сейсмостойких конструктивных решений зданий и сооружений, дающий количественную оценку оптимизационному критерию;

2. Предложена методика, связывающая результаты динамического расчета с финансовыми показателями ущерба в здании при землетрясении;

3. Предложен способ построения кривой несущей способности, необходимой для определения ущерба в здании при землетрясении;

4. Предложена вероятностная модель для оценки количества землетрясений на площадке строительства за жизненный цикл здания;

5. Основные этапы решения оптимизационной задачи по предложенной методике продемонстрированы на конкретных примерах.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика, пункт 7 «Теория и методы расчета сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы и так далее)»

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использовались методы нелинейной строительной механики, теории сейсмостойкости, экономики сейсмостойкого строительства, элементы теории вероятности и оптимизации. Использовались численные методы решения дифференциальных уравнений для описания эффекта снижения ускорений в сейсмоизолированном здании, а также совместно использовались различные программные комплексы для решения поставленных задач и проверки адекватности получаемых результатов.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается согласованностью полученных расчетных данных с результатами, приводимыми другими авторами в рамках своих исследований, опирающимися в свою очередь на экспериментальные и статистические данные, накопленные в результате длительных наблюдений. Помимо этого, на основных этапах работы проводилась проверка адекватности и сходимости получаемых расчетных данных с помощью общепризнанных сертифицированных программных продуктов, реализующих те или иные вычислительные процедуры.

Апробация работы

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы подтверждены апробацией на следующих конференциях и семинарах:

- XXVII Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» – МКМ 2017. Основы статического и динамического разрушения. Санкт-Петербург, Дом ученых, 25-27 сентября 2017 года;
- 74-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета, СПбГАСУ, 3-5 октября 2018 года.
- 13-я Российская Национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию. Санкт-Петербург, CITYTEL отель «Санкт-Петербург», 1-6 июля, 2019 года.
- 8-е Савиновские чтения, ПГУПС, 3-6 февраля, 2020 года.

Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 10 научных статьях, в том числе 4 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, 3 статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science и 3 статьи в изданиях, входящих в иные базы цитирования.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 175 страницах печатного текста, состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 154 источника. В работе представлено 68 рисунков, 22 таблицы и 60 формул.

Первая глава посвящена литературному обзору и сбору актуальной для исследования информации.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма оптимизации, определению целевой функции и варьируемых параметров, а также проблемам, связанным с их выбором.

Третья глава посвящена методике оценки ущерба в здании при землетрясении.

Четвертая глава посвящена проблеме оценки границ несущей способности и податливости здания, а также проблемам, связанным с построением кривой несущей способности здания.

Пятая глава посвящена проблеме вероятностной оценки сейсмического ущерба.

В **шестой главе** демонстрируется применение оптимизационного алгоритма для решения конкретных задач.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Предложен алгоритм оптимизации сейсмостойких конструктивных решений зданий и сооружений, дающий количественную оценку оптимизационному критерию

Проанализировав различные оптимизационные методики оказалось, что наиболее реализуемым алгоритмически следует считать экономический критерий, предложенный в работах отечественных исследователей. Приняв за основу используемый ими алгоритм и оставляя только те члены, которые зависят от антисейсмических конструктивных мероприятий, была получена формула

$$E = -K_{ant} - f(k, N) \sum_{I=I_{\min}}^{I=I_{\max}} L(I) \cdot D_{rel}(I), \quad (1)$$

где K_{ant} – затраты на антисейсмические мероприятия; $f(k, N)$ – коэффициент приведения затрат, вычисляемый в зависимости от нормы амортизации и годовой прибыли производства; $L(I)$ – среднегодовое число I -балльных землетрясений на площадке строительства; N – время после начала эксплуатации в годах.

Финансовые потери вследствие землетрясений определяются ущербом $D_{rel}(I)$ с учетом количества землетрясений силой I и корректировки стоимости ущерба от года к году. При наличии антисейсмических мероприятий наступивший ущерб $D_{rel}(I)$ будет меньше, но придется потратить средства K_{ant} на этапе строительства. Соотношение этих параметров и определяет оптимизацию E .

Варьируемым параметром при оптимизации проектов следует принять коэффициент K_p , учитывающий пластический ресурс сооружения. Задание K_p определяет степень сейсмоусиления, что для традиционного способа повышения сейсмостойкости означает увеличение или уменьшение прочностных характеристик элементов здания. В случае применения системы сейсмоизоляции (ССИ) варьированию подлежат параметры силовой характеристики, соответствующей применяемой ССИ.

2. Предложена методика, связывающая результаты динамического расчета с финансовыми показателями ущерба в здании при землетрясении

Влияние варьируемых параметров на значение целевой функции оказывается через параметр $D_{rel}(I)$, характеризующий конструктивный ущерб, причиняемый зданию землетрясением силой I . Методика определения ущерба основана на идее проектирования зданий по рабочим характеристикам («*Performance based earthquake engineering*»). При землетрясении на здание действует кинематическое возмущение (движение фундамента), под действием которого здание отклоняется от положения равновесия (Рисунок 1а). Величина этого отклонения характеризует уровень разрушаемости здания. Графическое изображение этой зависимости в литературе называется кривой несущей способности (КНС).

При одинаковой интенсивности воздействия усиленные по-разному здания будут отклоняться на разную величину и, следовательно, соответствовать той или иной рабочей характеристике (Рисунок 1б). Если вместо рабочих характеристик на КНС указать финансовые показатели ущерба, связав их с горизонтальными перемещениями верха сооружения, то можно проанализировать повреждаемость элементов при увеличении сейсмической нагрузки.

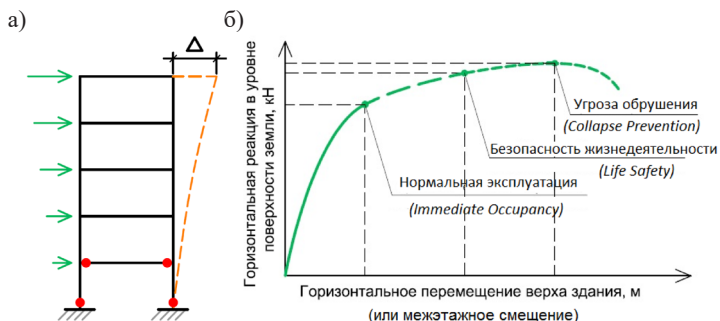


Рисунок 1. Методика определения ущерба:

а) горизонтальное перемещение верха конструкции Δ , вызванное действием инерционных сил; б) кривая несущей способности с отмеченными на ней функциональными характеристиками здания

На КНС в общем случае можно выделить 3 участка в соответствии со стадиями нелинейной работы: прямолинейный наклонный (упругий), криволинейный (начало образования пластических шарниров), наклонный условно прямолинейный (соответствующий работе пластических шарниров) (Рисунок 2а). Однако расчеты показали, что при использовании билинейной КНС (Рисунок 2б) получаются практически такие же результаты, как и при использовании кривой с тремя участками.

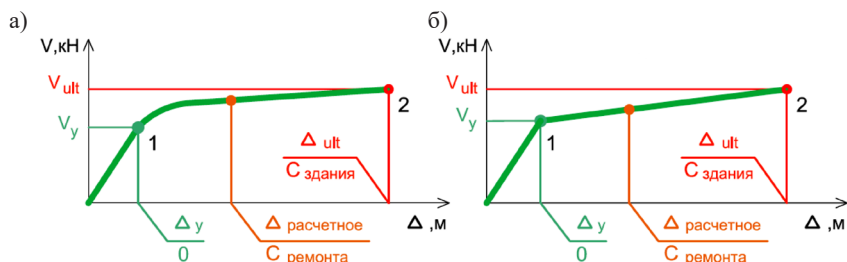


Рисунок 2. Общий вид кривой несущей способности здания (финансовой кривой): а) состоящей из 3 участков; б) билинейной

Таким образом, точка 1 соответствует началу образования пластических шарниров в элементах конструкции (ущерб равен 0), а точка 2 соответствует ис-

черпанию способности конструкции нести вертикальную нагрузку и обрушению (ущерб равен полной стоимости здания, т.е. 1). Т.к. считается, что в точке 2 происходит обрушение здания, то, вообще говоря, утрачивается и все содержимое внутри здания, а также гибнут или получают травмы люди, находящиеся в момент землетрясения внутри. В этом случае общий экономический ущерб оказывается больше, чем 1, т.к. необходимо затратить средства на ликвидацию разрушенного здания, выплатить страховки семьям погибших и т.п. Способам оценки такого рода ущербов посвящены исследования А.М. Уэдина, М.А. Богдановой, О.А. Сахарова, В.В. Сигидова. Но в данной работе эти виды ущербов не учитываются. В общем случае расчеты, проведенные по предлагаемой методике, удовлетворительно согласуются с аппроксимацией статистических данных об ущербе $D(K, I)$, задаваемых платежными матрицами.

В диссертации для определения горизонтальных перемещений верха зданий и сооружений при сейсмических воздействиях предлагается использовать следующие методы:

- нелинейный статический Pushover-анализ (НСМ);
- упрощенный нелинейный динамический метод (УНДМ), в котором здание рассматривается как система с одной степенью свободы (SDOF система);
- нелинейный динамический метод (НДМ), в котором здание рассматривается как многомассовая модель.

В последнем случае финансовый ущерб определяется как стоимость ремонта или замены элементов конструкции, в которых при рассматриваемом воздействии образовались зоны неупругих (пластических) деформаций.

Проведена оценка результатов расчета по каждому из описанных методов, сравнивались максимальные горизонтальные перемещения одного и того же узла модели (для НСМ и НДМ) и перемещения центра тяжести SDOF системы (для УНДМ). Для каждого типа здания найден наиболее консервативный метод расчета, который следует предпочесть при определении ущерба.

3. Предложен способ построения КНС здания, необходимой для определения ущерба в здании при землетрясении

В диссертационной работе предлагается методика, позволяющая определить необходимые для построения КНС точки и обозначить границы несущей способности и податливости конструкции. Т.к. КНС всегда строится для определенного сооружения, то дальнейшие рассуждения сопровождаются вычислениями, производимыми на конкретном примере. Рассматривается типовой каркас одноэтажного промышленного здания (Рисунок 3а), имеющий размеры в плане 24 x 48 м. Высота до верха несущих конструкций покрытия 10.6 м. Покрытие состоит из стропильных ферм, устанавливаемых с шагом 4 м на 24-метровые подстропильные фермы, которые опираются на железобетонные (ж/б) колонны через стальные надколонники. Между верхними и нижними поясами стропильных ферм установлены связи. В основании ж/б колонн принимается жесткая заделка.

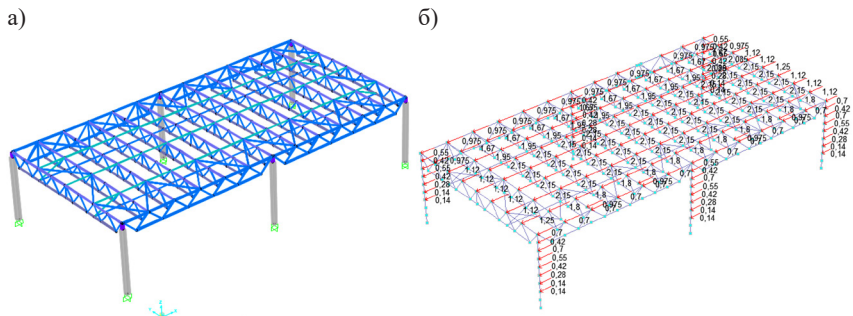


Рисунок 3. Здание, на примере которого производится построение КНС:
 а) общий вид модели; б) горизонтальная нагрузка V_y , приложенная к узлам расчетной схемы пропорционально распределению инерционных сил по основной форме колебаний конструкции

1. Первая точка КНС определяется из упругого расчета. Для рассматриваемого здания выполняется конструктивный расчет его конечно-элементной (КЭ) модели на постоянную и временную вертикальные нагрузки, суммарная величина которых равна $P=3420$ кН, а также горизонтальную нагрузку V_y , приложенную к узлам расчетной схемы пропорционально распределению инерционных сил, соответствующих основной форме колебаний, суммарное значение которой $V_y=214$ кН. Инерционные силы получены из расчета конструкции на 7-балльное сейсмическое воздействие по линейно-спектральному методу с коэффициентом $K_I=1$ и преобразованием принятых постоянных и временных вертикальных статических нагрузок в массы (Рисунок 3б).

По расчетным сочетаниям усилий подбираются сечения металлических конструкций покрытия и арматуры ж/б колонн. Перемещение верха системы Δ_y при одновременном действии P и V_y определяется по соответствующей комбинации и равно $\Delta_y=0.04$ м.

2. Предельная горизонтальная нагрузка V_{ult} получается умножением значений V_y на коэффициент, найденный по предельному анализу в ПК Ing+, основанному на методе псевдожесткостей Ю.Л. Рутмана. Расчет останавливается, когда конструкцией достигается состояние предельного равновесия. В результате данного расчета получен коэффициент 2.22, показывающий, что при умножении на него всех узловых горизонтальных сил суммарная горизонтальная нагрузка принимает предельное значение $V_{ult}=475$ кН.

Согласно методу псевдожесткостей места образования пластических деформаций – это элементы, в которых жесткость минимальна, а элементы, в которых жесткость стремится к бесконечности – это элементы, работающие упруго. В соответствии с этим на рисунке 4а красным цветом показаны элементы, в которых по результатам расчета жесткость оказалась минимальной.

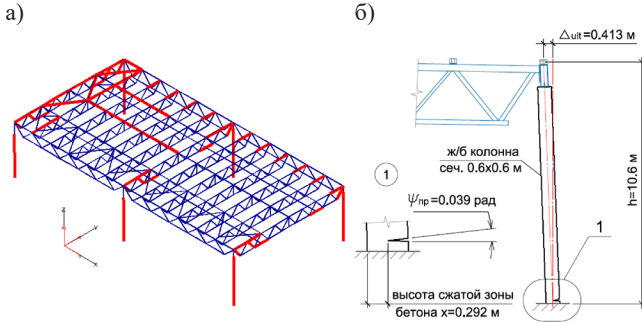


Рисунок 4. К определению точки 2 на КНС:

а) Результаты предельного анализа; б) предельное перемещение Δ_{ult}

3. В качестве критерия разрушения принимается предельное перемещение верха здания Δ_{ult} , которое необходимо определять для каждого конкретного здания индивидуально. Исходя из полученных результатов предельного анализа, а также особенности конструктивной схемы здания, в данном случае Δ_{ult} целесообразно устанавливать исходя из величины углов раскрытия трещин в шарнирах пластичности, образующихся в основании ж/б колонн. Эти углы не должны превышать предельных значений $\psi_i \leq \psi_{inp}$ где

$$\psi_{np,i} = \begin{cases} 0.035 + \frac{0.003}{\xi^d} & \text{при } \xi^d \geq 0.02, \\ 0.2 & \text{при } \xi^d < 0.02. \end{cases} \quad (\text{рад}). \quad (2)$$

Здесь ξ^d – относительная высота сжатой зоны бетона. От предельного угла раскрытия трещины в шарнире пластичности $\psi_{np,i}$ можно перейти к смещению соответствующей верхней точки (Рисунок 4б), вычисляя его по формуле

$$\Delta_{ult,i} = \sin \psi_{np,i} \cdot h, \quad (3)$$

где h – высота от уровня заделки колонны до верхней точки покрытия.

Окончательную величину Δ_{ult} определяем по среднему значению, полученному при расчете смещений верхних точек каждой ж/б колонны.

4. КНС представляется билинейной зависимостью « $V - \Delta$ » (Рисунок 5а).

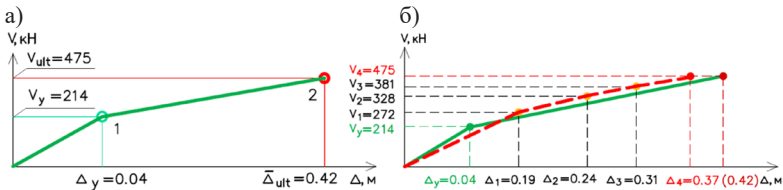


Рисунок 5. Результаты построения КНС:

а) билинейного вида; б) полученной по ANSYS (красный пунктир)

Для проверки адекватности предложенной методики используется ANSYS. В этом случае ж/б колонны задаются не стержневыми, а объемными элементами, моделирующими отдельно арматуру и бетон колонны. В результате получено максимальное горизонтальное перемещение 0.37 м, что на 10% меньше определенного ранее Δ_{ult} . Работа в течении всего процесса нагружения может также быть представлена КНС, но более детальной (Рисунок 5б).

4. Предложена вероятностная модель для оценки количества землетрясений на площадке строительства за жизненный цикл здания

Важным параметром, оказывающем влияние на экономический критерий, вычисляемый по формуле (1), является среднегодовое число землетрясений $L(I)$. Величина $L(I)$, задаваемая по картам сейсморайонирования свода правил очень мала (например, 1/1000 землетрясений в год). Количество воздействий n за жизненный цикл здания, выраженное через $L(I)$ в виде формулы (4) будет меньше 1, что не физично и затрудняет принятие решений по выбору варианта сейсмоусиления

$$n = L(I)N. \quad (4)$$

Чтобы иметь возможность статистически обоснованно спрогнозировать конкретное число воздействий разной силы на здание за установленный для него жизненный цикл, была использована известная модель, в которой землетрясения рассматривались как поток случайных событий. В этой модели интервал между землетрясениями заданной интенсивности является случайной величиной, подчиняющейся Пуассоновскому распределению.

Если принять, что события (землетрясения разной балльности) статистически независимы, то можно найти вероятность комбинации сейсмических событий, при которой в течение жизненного цикла произойдет k_1 землетрясений с интенсивностью I_1 , k_2 землетрясений с интенсивностью I_2 и т.д. Если рассматривать 3 вида интенсивностей: 9, 8 и 7 баллов, то эта вероятность равна

$$\omega_{123} = \frac{e^{-\lambda_1 \tau_0} (\lambda_1 \tau_0)^{k_1}}{k_1!} \cdot \frac{e^{-\lambda_2 \tau_0} (\lambda_2 \tau_0)^{k_2}}{k_2!} \cdot \frac{e^{-\lambda_3 \tau_0} (\lambda_3 \tau_0)^{k_3}}{k_3!}. \quad (5)$$

Здесь τ_0 – жизненный цикл здания; k_j – число землетрясений I -й балльности за жизненный цикл здания; $\lambda_1 = \frac{1}{T_1}$, где T_1 – среднее значение интервала времени между землетрясениями (период повторяемости) интенсивностью I баллов. Величина T_j задается по картам сейсморайонирования и равна $L(I)$ (для расчетов далее принимается, что площадка строительства расположена в г. Южно-Сахалинск, а соответствующие значения T_j определяются по картам В.И. Уломова).

С помощью формулы (5) создается таблица 1.

Таблица 1 имеет следующую структуру. В столбце 2 – вероятность появления сейсмических событий, соответствующих комбинации параметров k_j ,

k_2, k_3 , которая приведена в столбце 3. Для каждой строки таблицы 1 рассчитывается экономический ущерб, соответствующий конкретному варианту сейсмических событий (столбец 4). Величина ω (последнее число в столбце 2) есть вероятность реализации поля событий, которое описано столбцом 3. Эта вероятность должна быть близка к единице. В противном случае число строк в таблице 1 должно быть увеличено.

Таблица 1

Номер слагаемого	Вероятность комбинации сейсмических событий, соответствующих параметрам k_1, k_2, k_3	Количество землетрясений разной силы k_1 (9-балльных), k_2 (8-балльных), k_3 (7-балльных) за жизненный цикл	Ущерб от соответствующей комбинации землетрясений D_{k_1, k_2, k_3}
1	0.33926797	$k_1=0; k_2=0; k_3=0$	0
2	0.264451234	$k_1=0; k_2=0; k_3=1$	0.026445
3	0.102965607	$k_1=0; k_2=0; k_3=2$	0.041186
4	0.026667351	$k_1=0; k_2=0; k_3=3$	0.024001
5	0.067837018	$k_1=0; k_2=1; k_3=0$	0.036157
6	0.052877326	$k_1=0; k_2=1; k_3=1$	0.033471
7	0.020588091	$k_1=0; k_2=1; k_3=2$	0.019209
8	0.005332167	$k_1=0; k_2=1; k_3=3$	0.119652
9	0.006754694	$k_1=0; k_2=2; k_3=0$	0.014401
10	0.005265122	$k_1=0; k_2=2; k_3=1$	0.011752
11	0.002050005	$k_1=0; k_2=2; k_3=2$	0.005191
12	0.000530937	$k_1=0; k_2=2; k_3=3$	0.00161
13	0.033926797	$k_1=1; k_2=0; k_3=0$	0.033927
14	0.026445123	$k_1=1; k_2=0; k_3=1$	0.02909
15	0.010296561	$k_1=1; k_2=0; k_3=2$	0.014415
16	0.002666735	$k_1=1; k_2=0; k_3=3$	0.005067
17	0.006783702	$k_1=1; k_2=1; k_3=0$	0.010399
18	0.005287733	$k_1=1; k_2=1; k_3=1$	0.008635
19	0.002058809	$k_1=1; k_2=1; k_3=2$	0.00398
20	0.000533217	$k_1=1; k_2=1; k_3=3$	0.001297
21	0.000675469	$k_1=1; k_2=2; k_3=0$	0.125232
22	0.000526512	$k_1=1; k_2=2; k_3=1$	0.001702
23	0.000205001	$k_1=1; k_2=2; k_3=2$	0.180832
24	5.30937E-05	$k_1=1; k_2=2; k_3=3$	0.000214
Сумма ω	0.984046275	Суммарный ущерб	0.747863

Ущерб, указанный в столбце 4, является дискретной случайной величиной. Вероятность появления этого ущерба равна ω_{k_1, k_2, k_3} (см. формулу (5)). Поэтому оценка математического ожидания общего ущерба для всех вариантов сейсмических событий равна

$$D = \sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3} \cdot \omega_{k_1, k_2, k_3}. \quad (6)$$

Формула (6) и таблица 1 позволяют придать статистический смысл формуле (1) и развить методологию выбора варианта сейсмоусиления.

Рассмотрим определение финансового ущерба с помощью (6) и таблицы 1. Каждой строке таблицы 1 соответствует финансовый ущерб

$$D_{k_1, k_2, k_3} = D(I_1) \cdot k_1 + D(I_2) \cdot k_2 + D(I_3) \cdot k_3. \quad (7)$$

где $D(I_1)$, $D(I_2)$, $D(I_3)$ – финансовые параметры, описывающие ущерб при воздействии 9, 8 и 7-балльных землетрясений и определяемые по методологии, изложенной в п. 2.

Величины $D(I_1)$, $D(I_2)$, $D(I_3)$ надо привести к моменту появления сейсмического события, т.е. учесть полученную прибыль и снижение стоимости сооружения. При предлагаемом подходе можно скорректировать ущерб, умножив D_{k_1, k_2, k_3} на усредненное значение коэффициента приведения

$$f_{cp}(k, N) = \frac{f(k, N)}{N}. \quad (8)$$

Тогда затраты на восстановление сооружения (ликвидацию ущерба) равны

$$\bar{D} = f_{cp}(k, N) \cdot D = f_{cp}(k, N) \cdot \sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3} \cdot \omega_{k_1, k_2, k_3}. \quad (9)$$

Таким образом, минимизируемый критерий имеет вид

$$\bar{E} = -K_{ant} - f_{cp}(k, N) \cdot \sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3} \cdot \omega_{k_1, k_2, k_3}. \quad (10)$$

Критерий (10) имеет ясный статистический смысл. Оптимизацию по критерию (10) можно проводить, если речь идет о массовой застройке однотипных зданий в различных сейсмоопасных районах.

Физический смысл (1) и (10) одинаков. Однако, формула (1) дает оценку E менее точно, если исходить из гипотезы Пуассоновского потока событий. Поэтому следует предпочесть формулу (10). Иначе говоря, подход (1) к выбору варианта сейсмоусиления является модернизацией методики (1).

Сравнение вариантов сейсмоусиления можно проводить, исходя из наилучшей с экономической точки зрения и статистически значимой, но не усредненной финансовой оценки ущерба. В этом случае устанавливается минимально значимая величина вероятности. В таблице 1 события, вероятности которых оказываются ниже этой границы, отбрасываются. Затем из оставшихся событий выбираются те, которые приводят к наибольшему ущербу. В результате такого отбора оптимизация проводится по критерию

$$\tilde{D} = f_{cp}(k, N) \cdot D = f_{cp}(k, N) \cdot \sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3}, \quad (11)$$

где k_1, k_2, k_3 соответствуют статистически значимому (по установленной величине статистического минимума) и наилучшему с экономической точки зрения варианту.

В критерии (11) отсутствует усреднение («размазывание») затрат. Поэтому оптимизацию по критерию (11) следует проводить, если речь идет о строительстве уникального здания или сооружения в сейсмоопасном районе.

5. Основные этапы решения оптимизационной задачи с помощью предложенной методики продемонстрированы на конкретных примерах

1. В качестве *первого примера* производится оптимизация сейсмостойких конструктивных решений (КР) для здания, аналогичного представленному на рисунке 3. Сравнивается экономический эффект во времени при выборе одного из четырех вариантов антисейсмических мероприятий:

1. Частично-усиленного традиционным способом $S_{PS}(K_I=0.5)$;
2. Максимально-усиленного традиционным способом $S_{MS}(K_I=1)$;
3. Сейсмоизолированного резинометаллическими опорами S_{PMO} ;
4. Сейсмоизолированного резинометаллическими опорами со свинцовым сердечником S_{PMOCC} .

Для расчета конструктивных параметров традиционно усиленных вариантов строятся КЭ модели зданий, сейсмическое воздействие задается в соответствии с требованиями свода правил, расчет производится по линейно-спектральной теории.

Методика подразумевает наличие типового проекта S_{ip} , представляющего собой каркас, рассчитанный на основное сочетание постоянных, длительных и кратковременных нагрузок без учета сейсмического воздействия, т.е. $K_I=0$. В соответствии с такой схемой загрузки из линейно-упругого расчета определяются необходимые размеры сечений металлических конструкций покрытия здания и производится подбор арматуры в ж/б колоннах по расчетным сочетаниям усилий.

Для повышения сейсмостойкости не усиленного каркаса S_{ip} традиционным способом выполняется его расчет на 8-балльное сейсмическое воздействие с коэффициентом $K_I=0.5$, что приводит к увеличению площадей арматуры ж/б колонн. Такой вариант традиционного сейсмоусиления обозначим как «частично-усиленный» каркас S_{PS} , т.к. $K_I=0.5$ снижает расчетную нагрузку от землетрясения на 50%, тем самым подразумевая возможность частичного повреждения данного каркаса.

Другой вариант традиционного усиления – здание с максимально-усиленным несущим каркасом S_{MS} . Для этого варианта задается расчетная сейсмичность 9 баллов и принимается коэффициент $K_I=1$. Антисейсмические мероприятия осуществляются также, как и в случае варианта S_{PS} , т.е. путем увеличения площади сечения ж/б колонн, количества арматуры и сечений элементов метал-

лических конструкций покрытия. Назначается более высокий класс бетона по прочности (вместо В25 принимается В30) и марка стали некоторых элементов покрытия (вместо С245 принимается С345). Узлы сопряжения подстропильных ферм с колоннами и связей по верхним и нижним поясам ферм проектируются в этом случае жесткими.

На рисунке 6 приводятся данные по армированию сечений ж/б колонн, полученные для каждого варианта.

	не усиленный каркас S_{np}	частично-усиленный S_{PS}	максимально-усиленный S_{MS}
K1	<p> $\varnothing 16$ A500 16 шт. $\varnothing 6$ A240 шаг 200 </p>	<p> $\varnothing 32$ A500 16 шт. $\varnothing 8$ A240 шаг 200 </p>	<p> $\varnothing 40$ A500 24 шт. $\varnothing 10$ A240 шаг 200 </p>

Рисунок 6. Данные по армированию сечений ж/б колонн

Наряду с традиционными способами сейсмоусиления рассматриваются специальные, заключающиеся в применении ССИ. В этом случае усиление самого каркаса здания не производится, т.е. используется типовой проект S_{np} , но для него проектируется ж/б сейсмический ростверк, который располагается на сейсмоизолирующих опорах, подобранных в зависимости от вертикальной нагрузки. Общий вес здания с учетом веса сейсмического ростверка и действующей длительной нагрузки составляет 4522 кН.

В качестве первого варианта специального сейсмоусиления S_{PMO} принимается ССИ в виде резинометаллических опор (РМО), основная часть демпфирования в которых реализуется за счет пластических демпферов (стальных стержней криволинейной формы). По расчету подбираются 15 опор с допустимой вертикальной нагрузкой 560 кН на каждую и горизонтальной жесткостью 0.54 кН/мм. Каждая сеймоопора устанавливается на отдельный ж/б фундамент, устраиваемый в грунтовом основании. Ко всем РМО дополнительно закреплены 4 пластических демпфера с билинейной силовой характеристикой (Рисунок 7а). На сеймоопорах располагается монолитный ж/б сейсмический ростверк, с которым жестко связаны колонны каркаса.

В качестве второго варианта специального сейсмоусиления S_{PMOCC} принимается ССИ в виде резинометаллических опор со свинцовым сердечником (РМО СС). Также подбираются 15 опор с билинейной силовой характеристикой и допустимой вертикальной нагрузкой 540 кН на каждую (Рисунок 7б). Нулевой цикл проектируется аналогично предыдущему варианту специального сейсмоусиления.

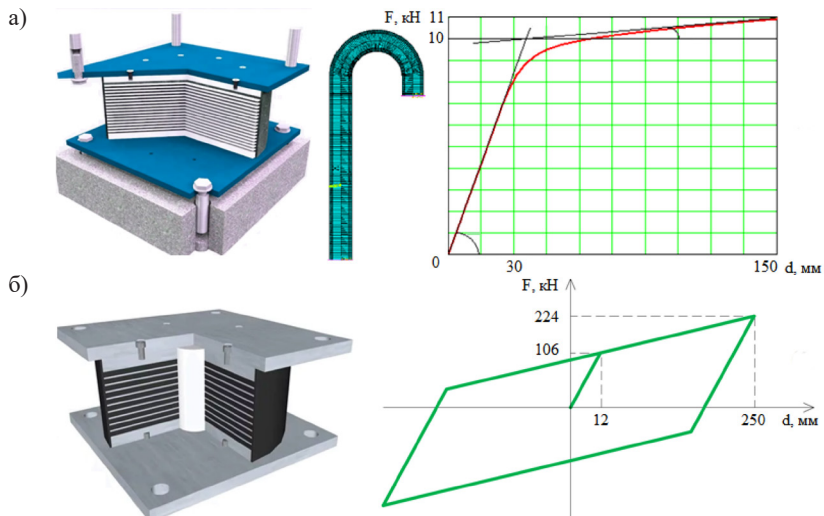


Рисунок 7. Характеристики применяемой сейсмоизоляции:

- а) резинометаллическая опора (РМО) и силовая характеристика пластического демпфера (стального стержня криволинейной формы); б) резинометаллическая опора со свинцовым сердечником (РМО СС) и ее силовая характеристика

Рассчитываются сметные стоимости каждого варианта КР, на основании которых определяются затраты на антисейсмические мероприятия K_{ant} . Формируются группы 9, 8 и 7-балльных воздействий для расчета ущерба $D_{rel}(I)$.

Кривые несущей способности (КНС) необходимо построить для каждого варианта КР каркаса, при этом для расчета ущерба в типовом и сейсмоизолированных вариантах используется одна и та же КНС, т.к. эффект от применения ССИ учтен при расчете воздействий. Расчеты показали, что наиболее консервативные оценки горизонтальных перемещений для данного типа зданий дает УНДМ и НДМ. На рисунке 8 представлена процедура определения ущерба.

Получив таким образом величины всех ущербов для каждого варианта КР от 9, 8 и 7-балльных воздействий, вычисляется экономический эффект E по двум разным критериям (10) и (11). Результаты расчета представлены в таблице 2.

Смысл результатов расчета заключается в том, что чем меньше итоговое значение E , тем экономически выгодней окажется данный тип конструктивно-го решения в конце жизненного цикла. Однако, результаты расчета по разным критериям отличаются, т.к. критерий (10) использует оценку математического ожидания общего ущерба для всех вариантов сейсмических событий, а критерий (11) исходит из наихудшей с экономической точки зрения и статистически значимой, но не усредненной финансовой оценки ущерба. В этом случае была установлена минимально значимая величина вероятности, равная 0.01.

События, вероятности которых оказались ниже этой границы, были отброшены. Затем из оставшихся событий было выбрано то, которое приводит к наибольшему ущербу (слагается 15 из таблицы 1). Наиболее эффективными в данном случае оказались традиционные способы повышения сейсмостойкости.

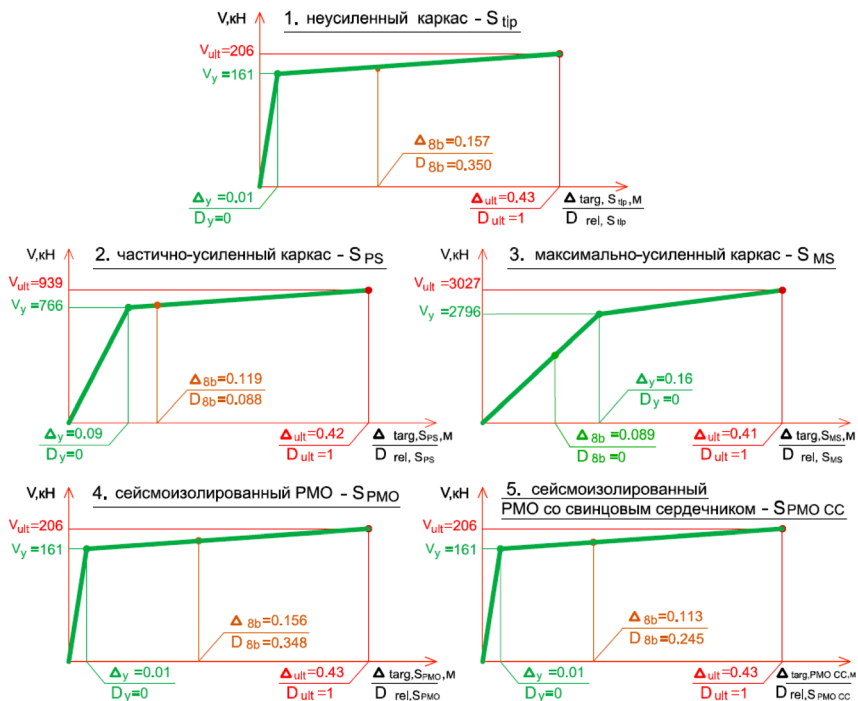


Рисунок 8. Определение ущерба от 8-балльного воздействия по КНС в: 1) типовом неусиленном каркасе S_{tip} ; 2) частично-усиленном каркасе S_{PS} ; 3) максимально-усиленном каркасе S_{MS} ; 4) сейсмоизолированном с помощью РМО каркасе $S_{PМО}$; 5) каркасе, сейсмоизолированном с помощью РМО со свинцовым сердечником $S_{PМО CC}$

Таблица 2

Значения экономического эффекта E , полученные в результате решения оптимизационной задачи для одноэтажного типового промышленного здания по а) критерию (10); б) по критерию (11)

а) Оптимизация по критерию (10)		б) Оптимизация по критерию (11)	
Конструктивное решение здания	Экономический эффект E	Конструктивное решение здания	Экономический эффект E
Не усиленное	-0.067	Не усиленное	-0.107

а) Оптимизация по критерию (10)		б) Оптимизация по критерию (11)	
Конструктивное решение здания	Экономический эффект E	Конструктивное решение здания	Экономический эффект E
Частично усиленное	-0.039	Частично усиленное	-0.090
Максимально усиленное	-0.054	Максимально усиленное	-0.058
Сейсмоизолированное РМО	-0.115	Сейсмоизолированное РМО	-0.155
Сейсмоизолированное РМО со свинцовым сердечником	-0.125	Сейсмоизолированное РМО со свинцовым сердечником	-0.169

2. В качестве *второго примера* рассматривается 10-этажное ж/б каркасное здание с гибким нижним этажом и кирпичными перегородками на остальных этажах (ЖБКНИ здание). Здесь, наряду с не усиленным (типовым) проектом А (без каких-либо антисейсмических мероприятий) рассматриваются два варианта сейсмоусиления: традиционное В и сейсмоизолированное С. Для колонн и ригелей ЖБ каркаса принимается бетон класса В25, арматура А500. Прочность кирпичной кладки на сжатие 8 Мпа, толщина 250 мм.

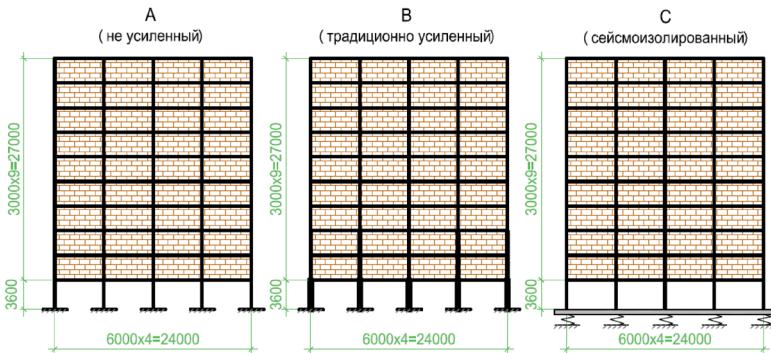


Рисунок 9. Схема поперечного каркаса ЖБКНИ здания

Поперечные сечения и армирование колонн нижнего этажа различаются в зависимости от выбранного варианта сейсмоусиления (рисунок 10).

Решается плоская задача. Общий вес типового каркаса (вариант А) с учетом веса перегородок, а также постоянных и длительных нагрузок, равен 13925 кН. Общий вес традиционно усиленного каркаса (вариант В) – 16230 кН. Для устройства кинематического фундамента (вариант С) применяются резинометаллические изоляторы РМО, общее количество опор – 5 шт. К каждой РМО

дополнительно закреплены 4 стальных стержня криволинейной формы (пластических демпфера с билинейной силовой характеристикой). На сейсмоопоре располагается монолитный ж/б сейсмический ростверк, с которым жестко связаны ж/б колонны каркаса (Рисунок 9с).

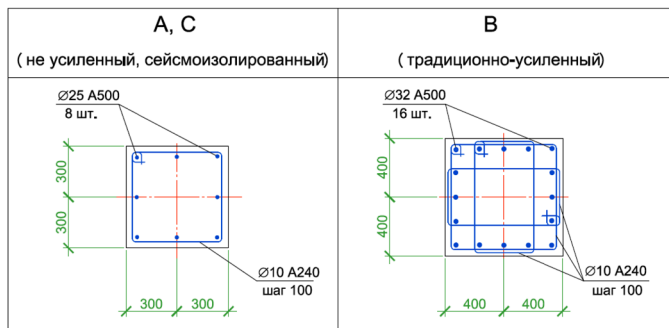


Рисунок 10. Армирование колонн нижнего этажа

Также, как и в первом примере, рассчитываются сметные стоимости каждого варианта, на основании которых определяются затраты на антисейсмические мероприятия K_{ant} . Формируются группы 9, 8 и 7-балльных воздействий для расчета ущербов $D_{rel}(I)$. Срок службы здания и площадка строительства принимаются такими же, как и в первом примере.

На основании серии расчетов по описанным методикам получаются КНС для каждого варианта, с помощью которых по горизонтальным перемещениям, полученным для данного здания уже с помощью НСМ, определяется ущерб. Экономический эффект E вычисляется также по критериям (10) и (11). Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Значения экономического эффекта E , полученные
в результате решения оптимизационной задачи для ЖБКНИ здания
по а) критерию (10); б) по критерию (11)**

Оптимизация по критерию (10)		Оптимизация по критерию (11)	
Конструктивное решение здания	Экономический эффект E	Конструктивное решение здания	Экономический эффект E
Не усиленное	-0.076	Не усиленное	-0.113
Традиционно усиленное	-0.068	Традиционно усиленное	-0.110
Здание на ССИ	-0.048	Здание на ССИ	-0.052

Результаты расчета показывают, что использование ССИ для данного типа зданий является более эффективным способом повышения сейсмостойкости

по сравнению с традиционным, при котором необходимо усиливать не только колонны 1-го этажа, но также колонны остальных этажей.

Применение ССИ демонстрирует еще большую эффективность в тех случаях, когда рассматривается не только конструктивный, но и другие виды ущерба, описанные в п. 2.

Численный анализ рассмотренных зданий показал, что эффективность применения ССИ зависит главным образом от конструктивных особенностей защищаемого объекта. Для протяженных в плане зданий применение рассмотренных типов ССИ оказалось менее эффективным, чем повышение прочностных характеристик элементов конструкции. Для многоэтажных зданий, имеющих небольшие размеры в плане, применение ССИ более эффективно, чем традиционное усиление.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Предложен оптимизационный алгоритм, дающий количественную оценку целесообразности выбора одного из нескольких вариантов сейсмоусиления здания по экономическому критерию;

2. Предложена методика определения конструктивного ущерба в зданиях и сооружениях при землетрясении расчетным способом, основанном на использовании нелинейных методов строительной механики;

3. Разработана методика оценки несущей способности и податливости здания при действии возрастающей горизонтальной нагрузки. Предложена методика построения кривой несущей способности здания;

4. Предложена методика вероятностной оценки количества землетрясений различной интенсивности на площадке строительства за жизненный цикл здания;

5. Произведен анализ различных способов сейсмоусиления зданий на конкретных примерах с помощью предложенного алгоритма оптимизации. Выявлено, что эффективность какого-либо способа сейсмоусиления зависит главным образом от конструктивных особенностей защищаемого объекта.

IV. 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. Иванов А. Ю. Оптимизация проектов сейсмоизолированных сооружений // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 36–45.

2. Иванов А. Ю. Методика построения кривой несущей способности здания // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 5 (286). С. 44–48.

3. Иванов А. Ю. Построение кривой несущей способности здания одноэтажного каркасного здания // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 6 (287). С. 32–39.

4. Иванов А. Ю., Рутман Ю. Л., Факири А. Методика оценки экономического эффекта при различных способах сейсмоусиления железобетонного каркаса с гибким нижним этажом и кирпичными перегородками // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 6. С. 34–42.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:

1. Ватин Н. И., Иванов А. Ю., Рутман Ю. Л., Черногорский С. А. Оптимизация конструкций сейсмостойких сооружений по экономическому критерию // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 8 (76). С. 77–93.

2. Иванов А. Ю., Черногорский С. А., Власов М. П. Оптимизация конструктивных решений сейсмостойкого проектирования по экономическому критерию с учетом применения системы сейсмоизоляции // Инженерно-строительный журнал. 2018 № 4 (80). С. 138–150.

3. Yu. L. Rutman, A. Yu. Ivanov, V. A. Meleshko. Discrete-analytical nonlinear analysis with improved computation accuracy for steel frame lateral response evaluation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 775 012147.

Статьи в других изданиях:

1. Иванов А. Ю. Метод определения ущерба в сейсмоизолированном здании при землетрясении. Материалы 74-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета 3–5 октября 2018 года. Ч. I. С. 35-42

2. Rutman Yu. L., Meleshko V. A., Ivanov A. Yu. Elastoplastic analysis methods and capacity curve developing features // Advancements in Civil Engineering C & Technology. 2018. № 2 (4). Pp. 1–3.

3. Иванов А. Ю. Оценка ущерба в здании при землетрясении с помощью нелинейного статического метода // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 2 (45) С. 46–51.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 20.11.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 110.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4. Отпечатано на МФУ.
198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

