

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Санкт-Петербург государственный
архитектурно-строительный университет»

На правах рукописи

НГУЕН ХАЙ ХОАН

**ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛОГИХ СКЛАДЧАТЫХ
ОБОЛОЧЕК С УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИМИ ВСТАВКАМИ НА
СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ**

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор
КОНДРАТЬЕВА Л.Н.

Санкт-Петербург
2014

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

СОДЕРЖАНИЕ.....	02
ВВЕДЕНИЕ.....	04
ГЛАВА I. ОБЗОР ТЕОРИИ РАСЧЁТА ОБОЛОЧЕК И СПОСОБОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ	
1.1. Состояние вопроса по применению складчатых оболочек.....	09
1.2. Обзор теории расчета оболочек	12
1.2.1. Развитие теории колебаний гладких и складчатых оболочек.....	12
1.2.2. Основные уравнения теории тонких пологих оболочек.....	16
1.2.3. Применение обобщенных функций для расчета складчатых оболочек.....	21
1.2.4. Решение уравнений движения тонких пологих оболочек в двойных тригонометрических рядах.....	22
1.2.5. Определение частот свободных колебаний пологих складчатых оболочек.....	25
1.3. Обзор методов сейсмической вибрационной защиты сооружений.....	27
1.3.1. Система с увеличением демпфирования.....	29
1.3.2. Система, реализующая принцип сейсмоизоляции.....	33
Вывод	38
ГЛАВА II. АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОДЫ РАСЧЁТА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ ПОЛОГИХ СКЛАДЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК	
2.1. Алгоритмы определения частот свободных колебаний тонких пологих гладких и складчатых оболочек.....	39
2.2. Разработка математических моделей складчатой полой оболочки на квадратном плане.....	40
2.3. Определение зависимости частоты свободных колебаний пологих складчатых оболочек на квадратном плане от различных параметров.....	41

2.4. Разработка математических моделей складчатой пологой оболочки на прямоугольном плане.....	46
2.5. Определение зависимости частоты свободных колебаний пологих складчатых оболочек на прямоугольном плане от различных параметров..	48
2.6. Анализ сравнительных результатов, полученных аналитическим и численным методом.....	53

ГЛАВА III. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОЛОЖЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ВСТАВОК (УПВ) В ПОЛОГОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБОЛОЧКЕ

3.1. Обоснование подбора места расположения УПВ в складчатой оболочке...	55
3.2. Определение места положения сдвиговой УПВ в пологой складчатой оболочке на квадратном плане	57
3.3. Определение места положения сдвиговой УПВ в пологой складчатой оболочке на прямоугольном плане	60

ГЛАВА IV. РАСЧЕТ ПОЛОГИХ СКЛАДЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК С УПВ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

4.1. Основные понятия расчета по акселерограммам	65
4.2. Получение силовых диаграмм сдвиговых УПВ и характеристики с гистерезисной петлей.....	69
4.3. Численный метод расчета пологих складчатых оболочек с использованием УПВ на сейсмические воздействия.....	76
4.4. Определение напряжений, вертикальных перемещений и абсолютных ускорений.	88
4.5. Разработка рекомендаций для подбора характеристик УПВ для снижения амплитуд колебаний в складчатых оболочках.....	95

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.....

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования.

Складчатые оболочки применяются в строительстве в качестве покрытий промышленных и общественных зданий, спортивных стадионов, ангаров, торговых комплексов.

Для возможности применения пологих складчатых оболочек в сейсмических районах предлагается в конструкцию добавить демпфирующие элементы. Исследовав известные виды сейсмической защиты зданий, было принято решение применить упругопластические вставки (УПВ), которые проявляют упругопластические свойства и необходимую податливость стыков оболочки при динамических воздействиях, сохраняя при этом цельность складчатой оболочки. Исследования жесткостных характеристик таких вставок и влияние наличия УПВ на напряжено-деформированное состояние (НДС) зданий сложной макроструктуры при неравномерной осадке представлены в работах В.И. Плетнёва, О.В. Голых, К.Т. Нгуена. Исследований влияния УПВ на работу полой складчатой оболочки при действии динамических нагрузок в отечественных и зарубежных опубликованных работах не обнаружено. Поэтому разработка метода расчета пологих складчатых оболочек с УПВ на сейсмические нагрузки является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования.

Аналитический метод расчета оболочек описан в статьях и монографиях В.З. Власова, В.В. Болотина, В.А. Амбарцумяна, А.Л. Гольденвейзера, Б.К. Михайлова, А.П. Филиппова, А.С. Вольмира, Э.И. Григолюка и других ученых.

Исследования влияния УПВ на НДС конструкций проведены В.И. Плетнёвым и его аспирантами на основе теоретических разработок Ю.Л. Рутмана.

Численные методы расчета оболочек разработаны В.В. Карповым, А.А. Семеновым, А.Ю. Атисковым, Д.А. Барановой, Л.П. Москаленко и другими исследователями.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования – разработка метода расчета пологих складчатых оболочек с упругопластическими вставками на сейсмические нагрузки.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Изучить состояние вопроса по применению складчатых оболочек.
2. Провести анализ способов сейсмической защиты строительных конструкций и сооружений.
3. Раскрыть особенности работы складчатых оболочек при динамических воздействиях и подобрать рациональный способ сейсмозащиты.
4. Выявить или разработать метод расчета складчатых оболочек, позволяющий учитывать демпфирующие свойства элементов сейсмозащиты.
5. Разработать рекомендации для установки элементов сейсмозащиты в складчатых оболочках.

Объект исследования – тонкие пологие складчатые оболочки на прямоугольном плане, составленные из плоских элементов.

Предмет исследования – методы расчета складчатых оболочек

Научная новизна работы:

1. Разработаны алгоритмы определения частот свободных колебаний тонкой полой гладкой и складчатой оболочки, отражающие особенности работы конструкции с непрерывными и разрывными параметрами.
2. Разработана математическая модель складчатой полой оболочки на квадратном плане.
3. Разработан метод определения места положения сдвиговой упругопластической вставки (УПВ) в складчатой оболочке, основанный на выявлении условий возникновения минимальных частот и определения опасных сечений оболочки с максимальными сдвиговыми усилиями, возникающими при колебаниях.
4. Разработан алгоритм расчета характеристик сдвиговой УПВ полой складчатой оболочки.

5. Разработан численный метод расчета складчатой оболочки, позволяющий учесть демпфирующие свойства УПВ при сейсмических нагрузках.

6. Получены новые численные результаты, подтверждающие эффективность использования УПВ в складчатых оболочках при сейсмических воздействиях. Установлено, что напряжения в элементах складчатой полой оболочки с размером плана 18х18 м уменьшаются в 2-4 раза, вертикальные перемещения в центральном сечении – примерно в 2 раза, абсолютные ускорения – в 1,5-1,7 раза.

Методологической основой является аналитический метод, предложенный В.З. Власовым, Б.К. Михайловым и другими учеными и численный метод, реализованный в программах «SAP2000» и «ANSYS».

Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, в разработке метода для определения рационального места положения сдвиговой упругопластической вставки (УПВ) в складчатой оболочке, в разработке алгоритма расчета характеристик УПВ в полой складчатой оболочке при сейсмических нагрузках, в разработке численного метода расчета пологих складчатых оболочек с УПВ на сейсмические нагрузки, в анализе влияния УПВ на ускорение, вертикальное перемещение и напряжение складчатой оболочки при сейсмических нагрузках.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика п.4 «Численные методы расчета сооружений и их элементов».

Практическая ценность и реализация результатов исследований:

Работа может быть использована для совершенствования теории колебаний пологих складчатых оболочек. Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе СПбГАСУ, Ханойского архитектурного университета и других вузов.

Разработаны рекомендации для подбора характеристик УПВ и места положения УПВ в складчатых оболочках.

Результаты исследований в практической области подтверждаются справкой о внедрении, выданной фирмой «Вьетнамское инвестиционное консультирование и строительное проектирование» (CDC), <http://www.cdc.biz.vn>.

Апробация работы: Основные положения работы докладывались на конференции: «Новые требования обеспечения безопасности в строительстве» (СПбГАСУ, СПб., с 30 по 31 октября 2012 г), на семинаре «Актуальные проблемы в расчетах строительных конструкций и сооружений» (СПбГАСУ, СПб., 6 февраля 2013 г), на конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (СПбГАСУ, СПб., 12 апреля 2013 г), на международной конференции «Актуальные проблемы архитектуры и строительства», (СПбГАСУ, СПб., с 25 по 28 июня 2013 г), на XXV международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» (СПбГАСУ, СПб., с 23 по 26 сентября 2013 г), на IX международной конференции «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте» (ПГУПС., СПб., 27-28 мая 2014 г).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 111 страниц машинописного текста. Работа включает 54 рисунка и 17 таблиц. Список литературы составляет 133 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, указана научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту, структура диссертации.

В первой главе проведен анализ отечественных и зарубежных исследований теории расчета складчатых оболочек и методов сейсмической защиты зданий.

Во второй главе показаны примеры и методика определения частот свободных колебаний пологих складчатых оболочек. Показано сравнение частот свободных колебаний складчатых оболочек, полученных аналитическим методом с частотами, вычисленными методом конечных элементов с помощью программы «SAP2000».

В третьей главе разработан метод для определения рационального места положения сдвиговой УПВ в складчатой оболочке и подбора характеристик УПВ. Разработаны рекомендации для подбора характеристик УПВ и места положения УПВ в складчатых оболочках.

В четвёртой главе приведены основные понятия расчета по акселерограммам. Разработан алгоритм определения характеристик УПВ при расчете пологой складчатой оболочки и численный метод расчета складчатой оболочки, позволяющий учесть демпфирующие свойства УПВ при сейсмических нагрузках.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., профессору Ю.Л. Рутману за помощь, оказанную при выполнении работы.

ГЛАВА I

ОБЗОР ТЕОРИИ РАСЧЁТА ОБОЛОЧЕК И СПОСОБОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

1.1. Состояние вопроса по применению складчатых оболочек

Складчатые оболочки применяются в строительстве в качестве покрытий промышленных и общественных зданий, спортивных стадионов, ангаров, торговых комплексов.

Эти конструкции перекрывают большой пролет без промежуточной колонны. Применяются способы индустриальных сборных строительства для возведения этих конструкций. Покрытие состоит из типичных унифицированных плоских элементов заводского изготовления. В практике строительства складчатые оболочки имеют преимущества перед гладкими оболочками. Изготовление и монтаж плоских элементов достаточно прост. В перекрытиях сосредоточенные нагрузки распределяются по линии излома, работающих как ребра складчатых оболочек. Складчатые оболочки имеют повышенную жесткость, прочность и устойчивость за счет пространственной работы. Применение складчатых оболочек обладает рядом преимуществ перед другими конструкциями в связи с их малой материалоемкостью и способностью художественно-эстетического воздействия на людей.

Покрытие современного промышленного и общественного здания может нести значительную сосредоточенную нагрузку. Для таких нагрузок, которые исходят из соответствия форм покрытий, следует исследовать самую рациональную форму оболочки в виде многогранника. Оболочки, монтируемые из плоских элементов, экономичнее оболочек, которые монтированы из криволинейного сборного элемента. Сборность оболочек и монтаж элементов на строительных площадках без лесов составит индустриализацию строительства, что можно приводить к ликвидации сезонной работы и делать перспективным строительство в условиях низких температур и длительной зимы.

При сборке пространственной конструкции необходимо следовать следующим рекомендациям: проектировать из блочных, тонкостенных панельных и других сборных элементов, которые после постановки на место необходимо соединить сваркой закладных деталей и омоноличиванием, что позволяет образовать складки, оболочки, своды. Конструировать и рассчитывать стыки сборной пространственной конструкции надо так, чтобы они могли передать усилие, которые возникают в стыках при монтаже и в процессе эксплуатации от одного элемента к другим.

Элемент сборной конструкции является целесообразным по размерам и форме с точки зрения технологии их изготовления, монтажа и перевозки. В частности нужно наблюдать за точностью процесса монтажа блоками с использованием укрупнительных сборок монтажных элементов на строительных площадках (СНиП 3.03.01).

Применять крупноразмерные элементы, изготавливаемые непосредственно на строительных площадках, целесообразно с экономической и технической точек зрения.

Требуется выбрать очертание сборной оболочки покрытия с расчетом удобства расчленения конструкций покрытий на минимальное число типов панелей при максимальной их повторяемости.

В качестве сборного элемента пространственной конструкции покрытия рекомендуется применять: плоские или цилиндрические панели, повышенной готовности; диафрагму и бортовой элемент в виде арок, балок, безраскосной балки-стенки и раскосной фермы, растянутая и изгибаемая диафрагма и бортовой элемент, а также панели длиной 12 м и более практично проектировать предварительно-напряженными и на период монтажа только в случае необходимости - с временным подкреплением.

В процессе конструирования сборного пространственного покрытия разрешается и другое членение при определенных технико-экономических обоснованиях, например на панели, которые включать части диафрагм или

бортового элемента. Примеры членения основного сборного покрытия согласно [85] показаны на рис. 1.1.

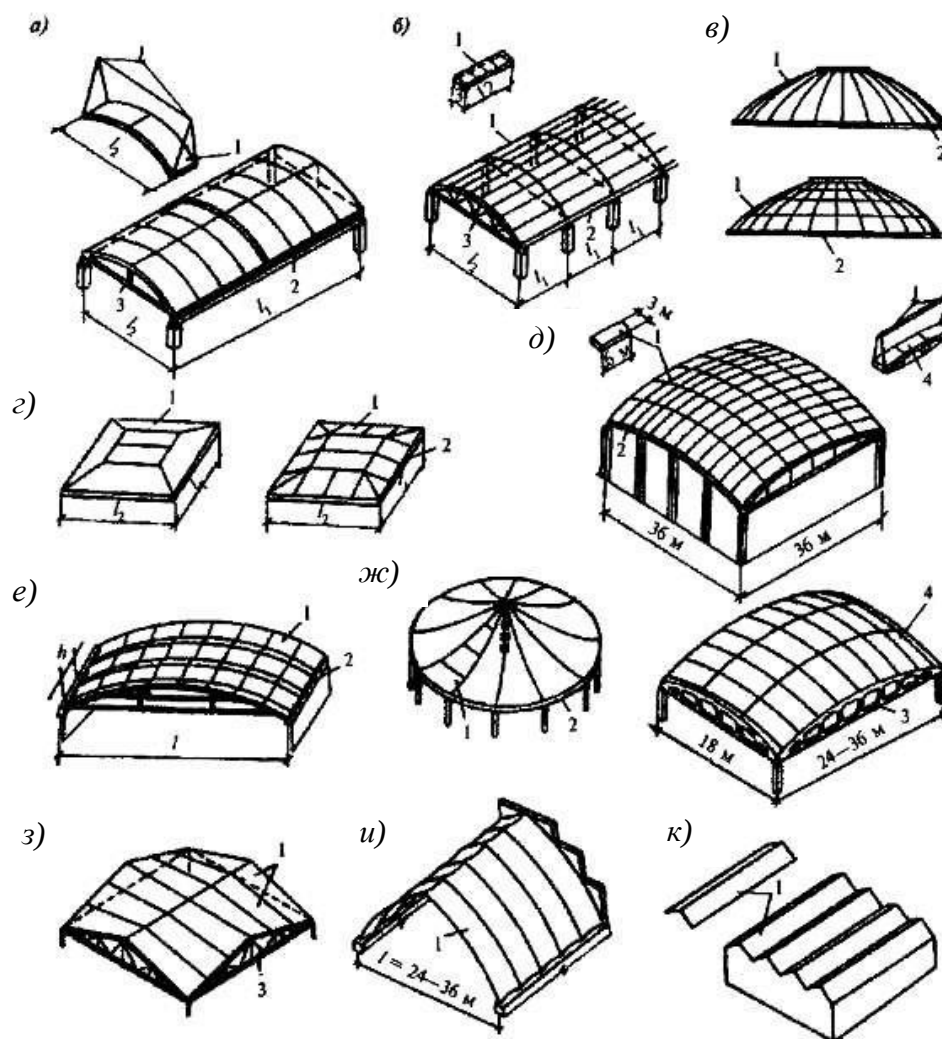


Рис.1.1.1. Примеры сборного пространственного покрытия

Рабочая арматура сборной пространственной конструкции предусматривается в ребрах панелей и плит, бортовой балке, диафрагме. В случае недостаточности арматуры, которая установлена в сборном элементе, в пространственной конструкции можно применить армирование в виде предварительно напряженного пояса. Напряжение арматуры можно реализовать натяжением на бетон и последующим обетонированием. Также рекомендуется укладывать стержни или сетки дополнительного армирования в стыки между панелями.

Сборные конструкции в виде панелей-складок или панелей-оболочек можно проектировать исходя из практики изготовления, перевозок и монтажа их как

готовой пространственной конструкции. Соединение элементов при укрупнительных сборках должно быть достаточно простым при выполнении.

В комбинированной пространственной конструкции покрытия плиты складчатых оболочек могут быть железобетонными, а бортовые элементы, устройства для подвеса крана и др. – из стали. При расчете такой конструкции целесообразно учесть возможную совместную работу железобетонного и металлического элемента [85].

1.2. Обзор теории расчета оболочек

1.2.1. Развитие теории колебаний гладких и складчатых оболочек

Методика определения частот и форм свободных колебаний оболочек показана в статьях и монографиях В.З. Власова, В.В. Болотина, В.А. Амбарцумяна, А.Л. Гольденвейзера, Б.К. Михайлова, А.П. Филиппова, А.С.Вольмира, Э.И. Григолюка и других ученых.

Первое исследование в области колебаний тонкой оболочки выполнено на сферических и цилиндрических оболочках. В прошлом теория колебаний сферических оболочек была в некоторой степени связана с практическими задачами о колебаниях колоколов, расчетная схема которых наиболее приближена к очертанию незамкнутых сферических оболочек.

Первая теоретическая работа по колебаниям цилиндрической и сферической оболочки принадлежат A.Love [106], [107]. Колебания колокола экспериментально исследовал Дж.У. Рэлей [72]. Уравнение колебания тонкой оболочки образуется путем прибавления в уравнение общей теории оболочки выражения для силы инерции и момента. А.Ляв в [50] предлагал пренебречь моментом силы инерции, так как не ввел никаких дополнений к внешним парам.

А. Ляв предлагал записать уравнения колебания в компоненте смещения, отбрасывая при выводе этого уравнения все произведения компонента смещения на их производные. Автор основывался на допущениях, что деформированное состояние в тонких пластинках или оболочках определено при помощи уравнений равновесия. При поперечном колебании элемент пластинок или оболочек во

время колебания находится в состоянии, сходным с состоянием равновесия. А. Ляв рассматривал два типа колебаний: поперечные, изгибные колебания, т.е. колебания без удлинений срединной поверхности или тангенциальные колебания к срединной поверхности и колебания удлинения, при которых происходит удлинение срединной поверхности. При условии цилиндрических оболочек эти колебания называется также продольными колебаниями. Он предполагал, что оболочка со слегка изогнутой срединной поверхностью может совершать колебание, сходное с поперечным колебанием плоской пластины. Частота этого колебания будет меньше, чем частота колебания, при котором происходит удлинение срединной поверхности [50].

В работах [63], [64], [80], [94], [96] и др. показано исследование спектра частот свободных колебаний оболочек.

В работе В. Флюгге [95] предложено решение задачи цилиндрических оболочек со свободно опертыми краями. Там были получены частотные уравнения в виде кубических уравнений. Метод определения собственных частот цилиндрической оболочки при жестком защемлении по краям разработан А. П. Филипповом в работе [94]. Теории колебаний сферической оболочки посвящена также работа Е. Райснера [120].

В работе Е.И. Оболашвили [63] приведена теория колебаний сферических оболочек. В ней даны комплексные представления системы уравнений колебания сферических оболочек. При соблюдении начального и граничного условия доказана теорема единственности для этой системы дифференциальных уравнений, вещественность соблюдения начального и граничного условия, а также вещественность собственных чисел-частот собственных колебаний. При помощи аналитических функций комплексной переменной Получен общий интеграл системы уравнений колебаний пологих сферических оболочек.

В 1953 г. опубликована работа В.Е. Бреславского [10], разработано теория колебания круглой замкнутой цилиндрической оболочки. В данной работе

приведен результат экспериментального и теоретического исследований свободных колебаний замкнутых круговых цилиндрических оболочек. Различные формы изгибных и осесимметричных колебаний рассмотрены. При исследовании осесимметричных колебаний с целью упрощения задачи автор указанной работы полагает равными нулю продольное перемещение и коэффициент Пуассона.

Поперечное колебание пологих оболочек были исследованы в работе О.Д. Онашвили [64]. В данной работе приведен анализ сравнения теоретических и экспериментальных данных и показаны результаты динамических испытаний. В этой работе показан конкретный обзор разработок колебаний полой оболочки, проведенных на основании теории полой оболочки В.З. Власова [15].

Методы динамических расчетов для оболочки различной формы приведены в работе В.В. Болотина [12]. Здесь уделено внимание обсуждению методов непосредственного интегрирования дифференциальных уравнений движений, предложенных для цилиндрической оболочки А.П. Филипповым [94] и Т.Т. Хачатуряном [96].

В работах Н.И. Бородачева [13] и Ч.Н. Койфмана [43] применяется метод интегральных преобразований, который дает результаты, совпадающие с результатами, полученными путем разложения решения в ряды по собственным значениям. Этот метод позволяет значительно сократить выкладки и дает обозримые формулы, особенно в сочетании с обобщенными функциями. В работе [8] показан анализ распределения собственных частот тонких упругих оболочек произвольного очертания. Колебания ортотропной оболочки двоякой кривизны показаны в работе [43].

Теоретические исследования В.С. Гонткевич [21] и Э.И. Григолюка [23] и играют большую роль в теории колебаний полой анизотропной оболочки. Автор получил фазо-частотную характеристику собственного и вынужденного нелинейного колебания пологих оболочек. Решение нелинейной задачи динамики оболочки разработано в работах А.С. Вольмира [16] и [17]. В работе [11]

приведены свободные колебания композитных оболочек в нелинейной постановке.

В работах В.С. Гонткевич [21] и Е.С. Сорокина [83] предложен учет влияния диссипативных сил при определении частот свободных колебаний оболочек. В работе [84] свободные колебания ребристой пологой оболочки и выпуклого многогранника исследованы Л.И. Столыпиной.

В 1995г. в работе [44] Н.В. Костючек разработал динамический расчет круговых цилиндрических оболочек методом начальных функций.

В работах [36] Л.Н Кондратьевой показаны исследования частот и форм свободных колебаний складчатых оболочек.

В 2001г. в работе [27] Е.А. Ильичев исследовал теорию определения свободных колебаний призматических оболочек многосвязного сечения. На основе вариационных методов В.З. Власова и статических аппроксимаций функции деформации контура оболочки, которая разработана О.Л. Соколовым, предложен эффективный аналитический способ определения частот свободных колебаний призматической оболочки многосвязных сечений регулярных структур.

В 2004г. в работе [52] А. В. Миргородский описал численные исследования колебаний однослойной и многослойной оболочки. В этой монографии исследованы свободные колебания пластин, пологих цилиндрических и сферических оболочек в линейной и геометрически-нелинейной постановках при различных амплитудах колебаний и исследована зависимость частоты вынужденных колебаний удлиненной пологой цилиндрической панели от частоты внешнего гармонического воздействия.

В 2004 г. в работе [75] Е. В. Саликов применил метод свободных колебаний для определения внутренних дефектов в клееной фанере в процессе ее производства.

Компьютерные технологии расчета оболочек разработаны в работах В.В. Карпова, А.А. Семенова, А.Ю. Атискова, Д.А. Барановой, Л.П. Москаленко в

работе [7]. Численные методы расчета строительных конструкций приведены в работах [5], [48], [77], [91] в которых приведен численный метод для разработки задач строительной механики по методу конечных элементов.

Применение МКЭ к расчету тонких плит и оболочек предложено в [29]. Численный расчет упругих тонких оболочек с использованием проектно-вычислительного комплекса SCAD показан в [97], где предложен подход к расчету пространственных конструкций и исследование новых типов поверхностей. В данной работе также приводятся основные понятия теории построения и расчета поверхностей, методика использования проектно-вычислительного комплекса SCAD при расчете оболочек, очерченных по аналитически заданным уравнениям поверхности. Использование программного комплекса «SAP2000» для решения инженерных задач применен М.К. Савовичем [76] для расчёта балки, рамы и фермы.

Анализируя отечественные [1–105] и зарубежные источники литературы [106–133], можно сказать, что описания методов расчета складчатых пологих оболочек с УПВ на сейсмические нагрузки не обнаружено.

1.2.2. Основные уравнения теории тонких пологих оболочек

Рассматриваются пологие оболочки, у которых стрела подъема не превышает одной пятой наименьшего линейного размера плана (рис 1.2).

$$\frac{f}{a} \leq \frac{1}{5}; \quad \frac{f}{b} \leq \frac{1}{5}.$$

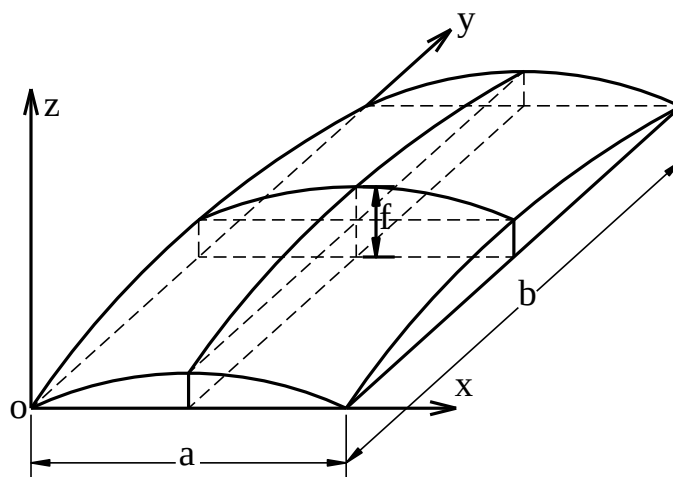


Рис 1.2. Геометрия гладкой пологой оболочки

Теория пологих оболочек построена на основе гипотез Кирхгофа-Лява [15].

Кроме гипотез Кирхгофа-Лява для теории оболочек принимаются общие допущения:

а) оболочка считается настолько полой, что геометрия ее поверхности можно считать совпадающей с геометрией плоскости ее проекции.

Это допущение объясняется следующим образом. Для полой оболочки с прямоугольным планом вместо выражения для квадрата линейного элемента

$$dS^2 = A^2 d\alpha^2 + B^2 d\beta^2$$

можно записать $dS^2 = dx^2 + dy^2$ (рис.1.3), т.е. считать, что параметры Ламе $A = B = 1$, а криволинейные ортогональные координаты α и β равны соответственно x и y . Гауссова кривизна поверхности полой оболочки приближенно принимается равной нулю

$$K = k_x k_y \approx 0,$$

где k_x, k_y – главные кривизны срединной поверхности оболочки.

б) можно пренебрегать моментными членами в уравнениях равновесия.

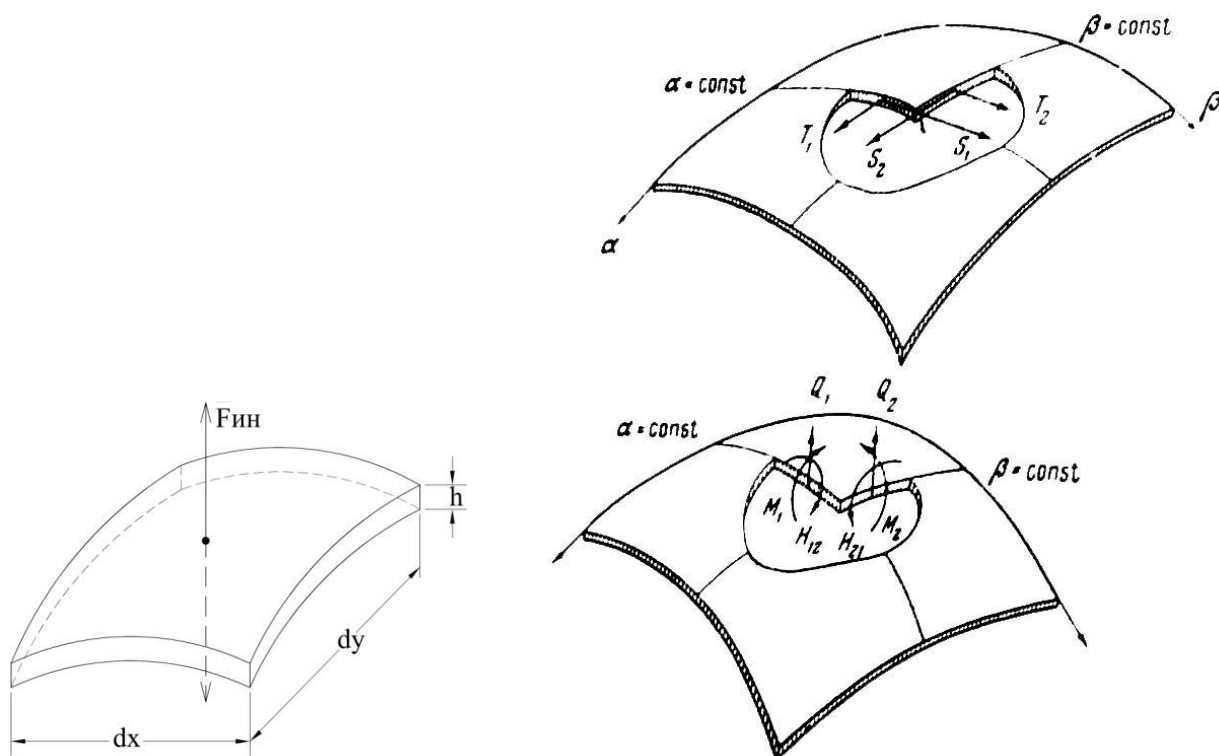


Рис 1.3. Элемент оболочки $dxdy$

На основании этих допущений и гипотез записываются уравнения равновесия элемента пологой оболочки (рис.1.3.) по [15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial S_2}{\partial y} + P_1 = 0; \\ \frac{\partial T_2}{\partial y} + \frac{\partial S_1}{\partial x} + P_2 = 0; \\ -k_1 T_1 - k_2 T_2 + \frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + P_3 = 0; \\ \frac{\partial H_{12}}{\partial y} - \frac{\partial M_1}{\partial x} - Q_1 = 0; \\ \frac{\partial H_{21}}{\partial x} - \frac{\partial M_2}{\partial y} - Q_2 = 0; \end{array} \right. \quad (1.1)$$

где

- T, S, Q, M, H – соответственно нормальные, сдвигающие усилия, поперечные силы, изгибающие и крутящие моменты;
- индекс 1 относится к направлению x , индекс 2 к направлению y , индекс 3 к направлению z ;
- P – внешняя нагрузка на единицу площади.

Соотношения между деформациями (линейными ε_1 и ε_2 , угловыми γ) записываются в виде:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x} + k_x w, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} + k_y w, \quad \gamma = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (1.2)$$

Изменения кривизны и кручение связаны с перемещениями следующими зависимостями:

$$\varkappa_1 = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \varkappa_2 = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \chi = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (1.3)$$

Система уравнений (1.1) – (1.3) совместно с уравнениями закона Гука приводится к двум совместным уравнениям относительно двух неизвестных – функции перемещения w (или прогиба) и функции напряжений φ , которая вводится подобно функции Прандтля в плоской задаче теории упругости, т.е.:

$$T_1 = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, T_2 = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, S = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}.$$

Разрешающая система уравнений равновесия пологих оболочек при учете только $P_3 = q$ имеет вид:

$$\begin{cases} D\Delta^2 w + \Delta_k \varphi = q; \\ \frac{1}{Eh} \Delta^2 \varphi - \Delta_k w = 0; \end{cases} \quad (1.4)$$

где Δ - дифференциальный оператор Лапласа

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2};$$

Δ_k - дифференциальный оператор В.З. Власова при $A = B = 1$

$$\Delta_k = k_x \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_y \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)};$$

где E - модуль упругости; μ - коэффициент Пуассона.

При учете геометрической нелинейности деформаций пологих оболочек соотношения между деформациями и перемещениями (1.2) записываются в виде:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x} + k_x w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2; \\ \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} + k_y w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2; \\ \gamma = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y}. \end{cases} \quad (1.5)$$

Исследования О.Д. Ониашвили [64] показали, что влияние нелинейных членов деформаций возрастает с увеличением пологости. Установлен предел пологости, после которого учет нелинейности деформации является обязательным. Согласно [64] в зависимости от пологости для оболочки двоякой положительной кривизны исследуются частоты свободных колебаний оболочек,

предельная пологость которых не превышает 32, т.е. $\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{f} \leq 32$. Поэтому первоначально задачу будем решать в линейной постановке.

Уравнения движения полой оболочкой получаются из системы уравнений равновесия (1.4) на основании принципа Даламбера. При этом, поскольку в уравнениях (1.4) присутствуют только нормальные составляющие внешних сил q , в уравнении движения пренебрегается тангенциальными составляющими сил инерции, что, согласно [64] не приводит к заметной погрешности для основных тонов колебаний. Поэтому в расчетах будем учитывать только нормальные силы инерции.

Для вывода системы уравнений движения рассмотрим элемент оболочки $dxdy$ (рис.1.3). Сила инерции $dF_{ин}$ направлена в сторону, противоположную ускорению a_z и равна

$$dF_{ин} = dM a_z ,$$

где $dM = \gamma h dx dy$ - масса элемента оболочки; h - толщина; γ - плотность материала оболочки.

Ускорение

$$a_z = \ddot{w} = \frac{d^2 w}{dt^2} ,$$

откуда $dF_{ин} = \gamma h dx dy \ddot{w}$. Следовательно, сила инерции $f_{ин}$, распределенная на единицу площади, определится по формуле:

$$f_{ин} = \frac{dF_{ин}}{dxdy} = \gamma h \ddot{w}.$$

Тогда внешняя нагрузка $q = -f_{ин} = -\gamma h \ddot{w}$.

Система уравнения движения полой оболочкой запишется в окончательном виде по [15]:

$$\begin{cases} D\Delta^2 w + \Delta_k \varphi + \gamma h \ddot{w} = 0 \\ \frac{1}{Eh} \Delta^2 \varphi - \Delta_k w = 0 \end{cases} . \quad (1.6)$$

1.2.3. Применение обобщенных функций для расчета складчатых оболочек

Расчет пологих складчатых оболочек связан с большими трудностями. В данном случае кривизна меняется не непрерывно в каждой зоне, поэтому необходимо составить отдельные дифференциальные уравнения, решения которых должны удовлетворять условиям контакта по границам этих зон разрывов и условиям по контуру всей конструкции.

Для разрешения этих трудностей применен метод начальных параметров, операционного расчета с применением обобщенных функций.

Обобщенные функции (дельта-функция Дирака, единичная Хевисайда) имеют широкое применение в расчете пологих складчатых оболочек и других областях технических расчетов.

В 1926 году дельта-функция использована в квантовой механике П.А. Дираком. Единичная функция и дельта-функция применены Н. М. Герсевановым под названием функциональных прерывателей в 1932 году. Позднее эта функция введена в задачах строительной механики в работах В.В. Новицкого, И.А. Симвулиди, К. С. Завриева, А. А. Назарова [62], Б. К. Михайлова, Е.В. Окладниковой [65], И. Б. Поваровой и других ученых [61].

Расчет оболочек-скачков был опубликован в 1948г. в работе А.А. Назарова [62], в которой применен аппарат обобщенных функций. Задачи оболочки с нерегулярностями решены с помощью этих функций С.А. Амбарцумяном [1].

Использование обобщенных функций для решения задач статики и динамики оболочки с разрывным параметром приведено в работах Н.З. Ройтфарба и Д.В. Вайнберга [14]. В данной работе рассмотрены задачи колебаний цилиндрических складчатых оболочек, имеющих изломы поверхности. В данном случае обобщенные функции применены для описания кривизны на изломах.

Теория расчета пологих складчатых оболочек с использованием обобщенных функций была разработана в работах Б.К. Михайлова

[56], Я. Ф. Хлебного, [98], А.А. Назарова [62], И. Е. Милейковского [53], В. В. Карпова [30], Ю.Н. Дрожжинова, Б.И. Завьялова [25], Л. Волевич, С. Гиндикина [49] В.А.Треногина [90] , А.Ф.Черняева [104] , Г.К. Толоконникова [92], С. Агранович [6] , Ф. Иосиф [28], И.М. Гельфанд [18], Л. Н. Кондратьевой [36], [124] Е. В. Окладниковой [65]

.

1.2.4. Решение уравнений движения пологих оболочек в двойных тригонометрических рядах

Решение уравнений равновесия прямоугольных в плане пологих оболочек (1.4) и соответственно уравнений движения (1.6) чаще всего представляется в двойных тригонометрических рядах.

Метод двойных тригонометрических рядов можно применять тогда, когда на противоположных поперечных краях оболочки $y = 0$ и $y = b$ или $x = 0$ и $x = a$ выполняются условия следующих двух типов:

- а) касательные напряжения на плоскости края равны нулю, перемещение из плоскости равно нулю,
- б) нормальное напряжение на плоскости края равно нулю и тангенциальные перемещения в плоскости края равны нулю.

При условиях первого типа на всех краях оболочки начальные функции перемещений, относящиеся к плоскости $z = 0$, можно выразить в виде рядов по [15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_0 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} u_{mn}^0 \sin \alpha_m x \cos \beta_n y; \\ v_0 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} v_{mn}^0 \cos \alpha_m x \sin \beta_n y; \\ w_0 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} w_{mn}^0 \cos \alpha_m x \cos \beta_n y, \end{array} \right. \quad (1.10)$$

где $\alpha_m = \frac{m\pi}{a}, \beta_n = \frac{n\pi}{b}$; m и n – волновые числа по направлениям осей x и y соответственно; a, b – размеры оболочки по направлениям осей x и y соответственно.

Функции напряжений соответственно представляются в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_z^0 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_{mn}^0 \cos \alpha_m x \cos \beta_n y; \\ \tau_{xz}^0 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \tau_{xz,mn}^0 \sin \alpha_m x \cos \beta_n y; \\ \tau_{yz}^0 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \tau_{yz,mn}^0 \cos \alpha_m x \sin \beta_n y. \end{array} \right. \quad (1.11)$$

Если на всех краях выполняются условия второго типа, то в разложениях (1.10) и (1.11) нужно изменить синусы на косинусы и косинусы на синусы. Если на двух поперечных краях выполняются условия первого типа, на 2-х других – условия второго типа, то тригонометрические функции одного аргумента необходимо оставить без изменений, а в функциях другого аргумента изменить синусы на косинусы и косинусы на синусы.

Коэффициенты в рядах для начальных функций (1.10) и (1.11) находятся из граничных условий на контуре в силу ортогональности тригонометрических зависимостей относительно искоемых коэффициентов (три других коэффициента сразу определяются из граничных условий при $z = 0$, отвечающих произвольному номеру m, n).

Для полой оболочки (рис.1.4.) с шарнирным опиранием по контуру, которое не препятствует горизонтальному смещению краев, решение системы уравнений (1.6) представлено в виде двойных тригонометрических рядов (1.10), (1.11). Искомые функции $\varphi(x, y, t)$ и $w(x, y, t)$ представлены в виде:

$$\begin{cases} \varphi(x, y, t) = \sum_m^{\infty} \sum_n^{\infty} \varphi_{mn}(t) \sin \alpha_m x \cos \beta_n y; \\ w(x, y, t) = \sum_m^{\infty} \sum_n^{\infty} w_{mn}(t) \sin \alpha_m x \cos \beta_n y. \end{cases} \quad (1.12)$$

Предполагаем, что свободные колебания оболочки происходят по гармоническому закону с частотой ω_{mn} с числом полуволн m, n вдоль осей x и y соответственно, тогда функции напряжений и перемещений $\varphi_{mn}(t)$ и $w_{mn}(t)$ задаем:

$$\begin{cases} \varphi_{mn}(t) = \varphi_{mn} \sin \omega_{mn} t; \\ w_{mn}(t) = w_{mn} \sin \omega_{mn} t. \end{cases} \quad (1.13)$$

Для условий шарнирного опирания оболочек по контуру представляем неизвестные функции в виде:

$$\begin{cases} \varphi_{mn}(x, y, t) = \varphi_{mn} \sin \omega_{mn} t \sin \alpha_m x \cos \beta_n y; \\ w_{mn}(x, y, t) = w_{mn} \sin \omega_{mn} t \sin \alpha_m x \cos \beta_n y. \end{cases} \quad (1.14)$$

Подставим выражения (1.14) в уравнение (1.6), получим систему однородных алгебраических уравнений относительно φ_{mn} и w_{mn} для оболочки с постоянными кривизнами $k_x = \text{const}$ и $k_y = \text{const}$:

$$\begin{cases} (DV_{mn}^2 - \gamma h \omega_{mn}^2) w_{mn} - Y \varphi_{mn} = 0; \\ Y w_{mn} + \frac{1}{Eh} V_{mn}^2 \varphi_{mn} = 0, \end{cases} \quad (1.15)$$

где

$$V_{mn} = \alpha_m^2 + \beta_n^2 \text{ и } Y = k_y \alpha_m^2 + k_x \beta_n^2;$$

D – значение цилиндрической жесткости оболочки $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$;

μ – коэффициент Пуассона; E – значение модуля упругости; h – значение толщины оболочки; γ – удельный вес материала.

Система (1.15) имеет нетривиальное решение только в случае равенства нулю ее определителя. Раскрыв определитель, получим формулу для квадрата круговой частоты гладкой пологой прямоугольной в плане оболочки с шарнирным опиранием по контуру [63]:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{1}{\gamma h} \left(DV_{mn}^2 + \frac{EhY^2}{V_{mn}^2} \right). \quad (1.16)$$

Для оболочек, условия опирания контура которых отличаются от шарнирного, форма представления неизвестных системы уравнений движения (1.6) в виде (1.14) является неприемлемой. Здесь функции напряжений и перемещений представляются фундаментальными функциями В.З. Власова с последующим применением приближенных методов Ритца, Бубнова-Галеркина и др.

1.2.5. Определение частот свободных колебаний пологих складчатых оболочек.

Под складчатыми будем понимать прямоугольные в плане пологие оболочки, составленные из плоских элементов (рис.1.4), со срединной поверхностью, вписанной в поверхность пологой гладкой оболочки двоякой положительной Гауссовой кривизны.

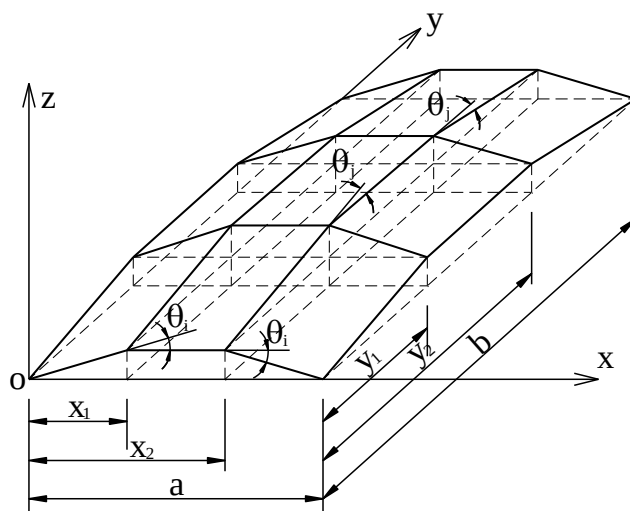


Рис.1.4. Геометрия складчатой оболочки.

Применение обобщенных функций [62] сыграло большую роль в совершенствовании расчета свободных частот оболочек с изломами срединной поверхности, в частности, δ - функции Дирака и единичной функции Хевисайда.

Для такой поверхности с изломами в одном направлении в работе [14] введено понятие об условной кривизне, выраженной через обобщенную функцию. В работе

[56] понятие об условной кривизне распространено на пологие оболочки двойкой кривизны:

$$\begin{cases} k_x = \sum_{i=1}^k \theta_i \delta(x - x_i); \\ k_y = \sum_{j=1}^l \theta_j \delta(y - y_j), \end{cases} \quad (1.17)$$

где

- θ_i, θ_j – углы изломов срединной поверхности оболочки на линиях соединений плоских элементов (рис.1.4);
- $\delta(x - x_i), \delta(y - y_j)$ – дельта-функции Дирака; $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, l$;
- k, l – число изломов поверхности в направлениях осей x и y соответственно.

Подставляя (1.17) в систему уравнений (1.6) и подействовав дифференциальным оператором Лапласа на неизвестные функции, получим систему уравнений движения складчатых оболочек по [42]:

$$\begin{cases} D\Delta^2 w + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \sum_{i=1}^k \theta_i \delta(x - x_i) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \sum_{j=1}^l \theta_j \delta(y - y_j) + \gamma h \ddot{w} = 0; \\ \frac{1}{Eh} \Delta^2 \varphi - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \sum_{i=1}^k \theta_i \delta(x - x_i) - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \sum_{j=1}^l \theta_j \delta(y - y_j) = 0. \end{cases} \quad (1.18)$$

Продифференцировав уравнения движения (1.18), подставляя зависимости (1.12) и (1.13) и приравнявая коэффициенты при $\sin \omega_{mn} t$, получим

$$\begin{aligned}
& D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} V_{mn}^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y - \sum_{i=1}^k \theta_i \delta(x - x_i) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{mn} \beta_n^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y - \\
& \sum_{j=1}^l \theta_j \delta(y - y_j) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{mn} \alpha_m^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y - \gamma h \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \omega_{mn}^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y = 0; \\
& \frac{1}{Eh} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{mn} V_{mn}^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y + \sum_{i=1}^k \theta_i \delta(x - x_i) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \beta_n^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y + \\
& \sum_{j=1}^l \theta_j \delta(y - y_j) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \alpha_m^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y = 0.
\end{aligned}$$

Для решения этих уравнений применим метод Бубнова-Галеркина. После некоторых математических преобразований получена формула для определения квадрата частоты свободных колебаний с симметрично расположенными линиями изломов поверхности для любого сочетания m и n в рамках принятых гипотез для тонких пологих оболочек по [42]:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{1}{\gamma h} \left(DV_{mn}^2 + \frac{4Eh \left(\frac{\beta_n^2}{a} \mathcal{G}_x + \frac{\alpha_m^2}{b} \mathcal{G}_y \right)^2}{V_{mn}^2} \right), \quad (1.19)$$

где введены обозначения: $\mathcal{G}_x = \sum_{i=1}^k \theta_i \sin^2 \alpha_m x$, $\mathcal{G}_y = \sum_{j=1}^l \theta_j \sin^2 \beta_n y$.

Формула (1.19) позволяет определять частоты свободных колебаний полой оболочки с произвольным числом изломов срединной поверхности в двух направлениях, как при одинаковых, так и при разных углах θ_i и θ_j .

В частном случае цилиндрической складчатой оболочки с кривизной в направлении оси x , равной нулю ($\mathcal{G}_x = 0$), приходим к формуле для ω_{mn}^2 , полученной Д. В. Вайнбергом и И. З. Ройтфарбом [14], что подтверждает правильность наших рассуждений по [42]:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{1}{\gamma h} \left(DV_{mn}^2 + \frac{4Eh^2}{b^2} \mathcal{G}_y^2 \frac{\alpha_m^4}{V_{mn}^2} \right).$$

1.3. Обзор методов сейсмической вибрационной защиты сооружений

В течение многих лет одновременно со способами увеличения несущей способности сооружений разрабатывался подход обеспечения сейсмостойкости сооружений путем уменьшения инерционной сейсмической нагрузки. Этот метод называется активной сейсмозащитой (АСЗ). Местная и общая АСЗ различаются. Первая применяется для защиты сооружения в целом, вторая для защиты отдельной конструкции внутри сооружения.

Ряд систем АСЗ был частично реализован. Большинство из таких систем входит в следующие типы: система с увеличением демпфирования; система, реализующая принцип сейсмоизоляции; адаптивная система с изменением характеристик; система, использующая гасители колебаний.

Внутри каждой из этих групп можно выделить несколько подгрупп, объединяющих системы сейсмозащиты по принципам конструктивной реализации или характеру динамических взаимодействий с защищаемой конструкциями сооружения. Классификация систем сеймовиброзащиты показана на рис 1.5. по [74] с учетом перечисленных принципов классификации [66].

Использование комбинированной системы сейсмозащиты, которая включает две или более из вышеуказанных систем, позволяет реализовать максимально положительное свойство каждой отдельной системы и уменьшить влияние их отрицательных свойств.

Методы сейсмозащиты позволяют снизить сейсмические нагрузки на строения в два-три раза. Они также позволяют проектировать конструкции с сейсмическими воздействиями на балл ниже. Система сейсмозащиты используется в различных областях, и зависит от этажности здания, от его конструкции и характеристик землетрясений.



Рис.1.5. Системы активных сейсмовиброзащит

1.3.1. Система с увеличением демпфирования.

Эта система вводит специальное устройство в конструкцию здания, которое позволяет повышать рассеяние энергии. Это устройство будет приводить к снижению сейсмического ускорения здания. Такими устройствами являются: вязкий демпфер различных типов, фрикционное устройство сухого трения, элемент с увеличением пластических деформаций являются такими устройствами.

Вязкий демпфер - это очевидный и эффективный способ для снижения амплитуд колебаний сооружений от землетрясения. Его можно использовать для промышленного сооружения. Фирма GERB в Германии является известным производителем вязкого демпфера (рис.1.6). Ряд конструктивных решений вязкого демпфера был применен в России [78] . Такие демпферы позволяют уменьшить колебания конструкции. Они мало изнашиваются и поэтому долговечность этого устройства неограниченна. Большая стоимость является единственным их недостатком.



Рис 1.6. Вязкий демпфер.

Элементы с увеличением пластических деформаций. Это специальное устройство характеризуется поглощением энергии сейсмического воздействия за счет повышения в материале конструкции пластических деформаций.

Достоинством данного устройства является небольшой размер. Их можно использовать в сооружениях с различной конструктивной схемой. Такие элементы имеют небольшую стоимость. Недолговечность устройства является недостатком и эти элементы могут выдержать всего 1-2 землетрясения.

Конструктивные реализации данных типов могут быть разнообразными. Поглотитель энергии разработан в Новой Зеландии. Там предложены конструкции экструзивных поглотителей энергии (рис 1.7).

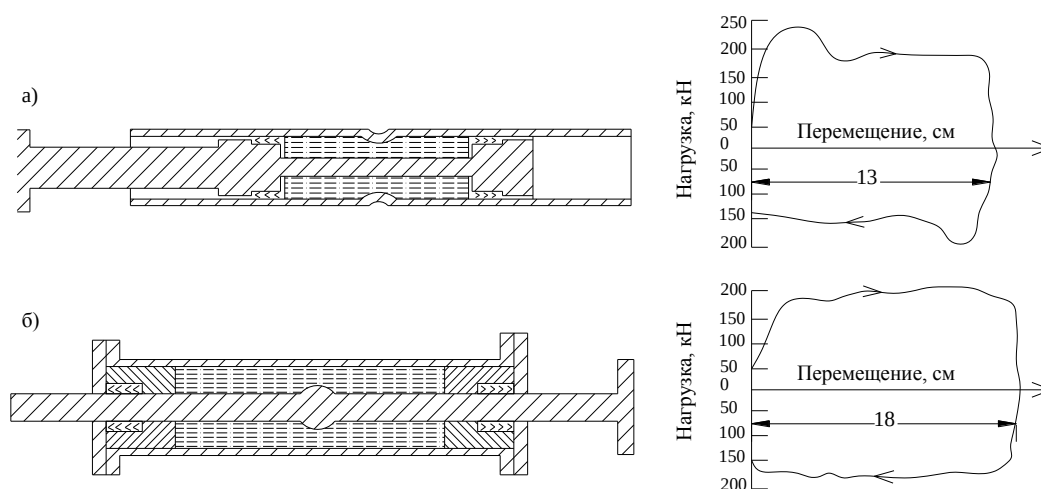


Рис. 1.7. Экструзивный поглотитель колебания разного типа и её диаграмма

Применение упругопластических вставок (УПВ) в высотных зданиях сложной макроструктуры (ЗСМ)

ЗСМ (рис.1.8) имеет большую жесткость, поэтому такой тип здания позволяет хорошо сопротивляться внешним воздействиям. Однако ЗСМ чувствительно к неравномерным осадкам фундаментов, которые приводят к большим перемещениям и значительным дополнительным усилиям в несущих конструкциях зданий.

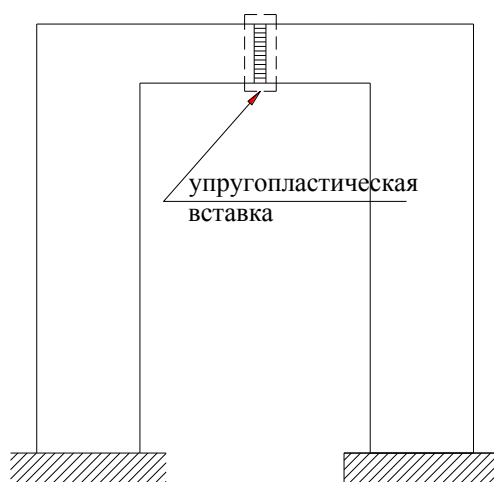


Рис.1.8. Здание сложной макроструктуры с УПВ

Эту проблему можно разрешить путем устройства упругопластических вставок в перемычках (рис.1.9), которые позволяют охранять здания от экстремальных нагрузок и от больших взаимных перемещений между частями сооружений.

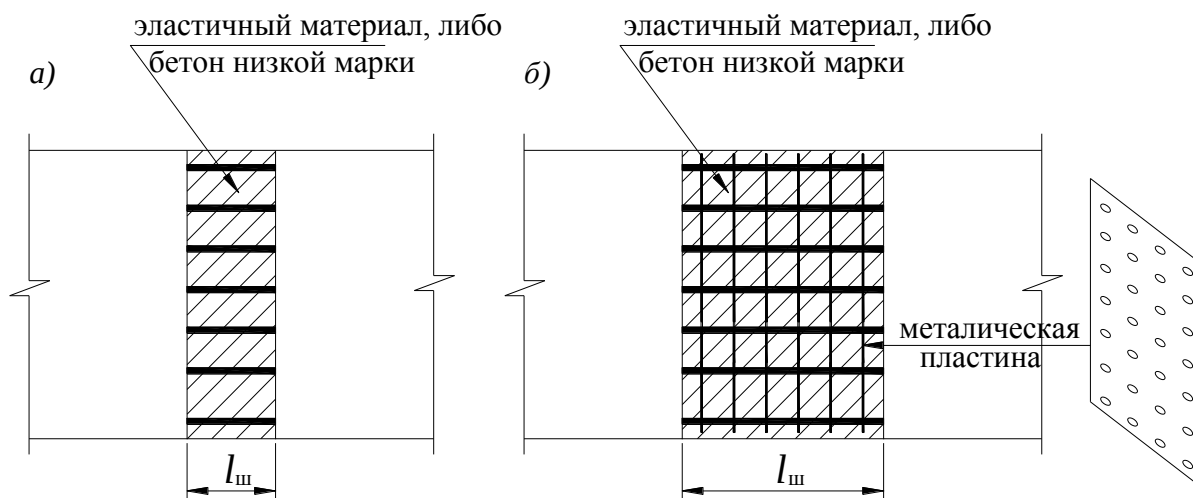


Рис. 1.9. Конструкция упругопластической вставки

Использование упругопластических связей для ферменных ЗСМ разработано в работе А. А. Смирнова [81]. Характер работы УПВ исследован Ю. Л. Рутманом [73]. Использование УПВ для ЗСМ шпоночного типа исследовано в работе О. В. Голых [20]. В работе К. Т. Нгуена [69] представлены силовые деформационные швы в виде УПВ шпоночного типа для ЗСМ.

Фрикционное устройство сухого трения. В сейсмических районах были применены предложения использования упруго-фрикционных систем [22] , [59]. Сущность этих предложений заключается в организации в конструкциях зданий зон, где при деформациях определенных зон происходят взаимные проскальзывания элементов конструкции при сухом трении.

Нестабильность демпфирующих характеристик является недостатком всего предлагаемого решения с применением сухого трения, есть риск их существенных деформаций в процессе эксплуатации зданий.

Г.Ш. Чануквадзе, Л.М. Марджанишвили в статье [102] описали разработанную систему сейсозащиты шестнадцатипятиэтажного каркасно-панельного жилого здания, предусматривающую использование фрикционных стен-диафрагм (рис. 1.10).

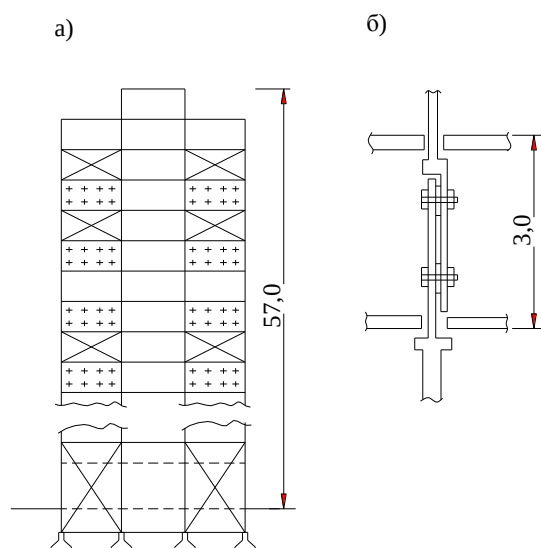


Рис. 1.10. Способ сейсозащиты в виде фрикционной диафрагмы.

Специальные демпферы были применены в здании торгового центра в Нью-Йорке для увеличения способности здания поглотить энергии в конструкции покрытий (рис.1.11).

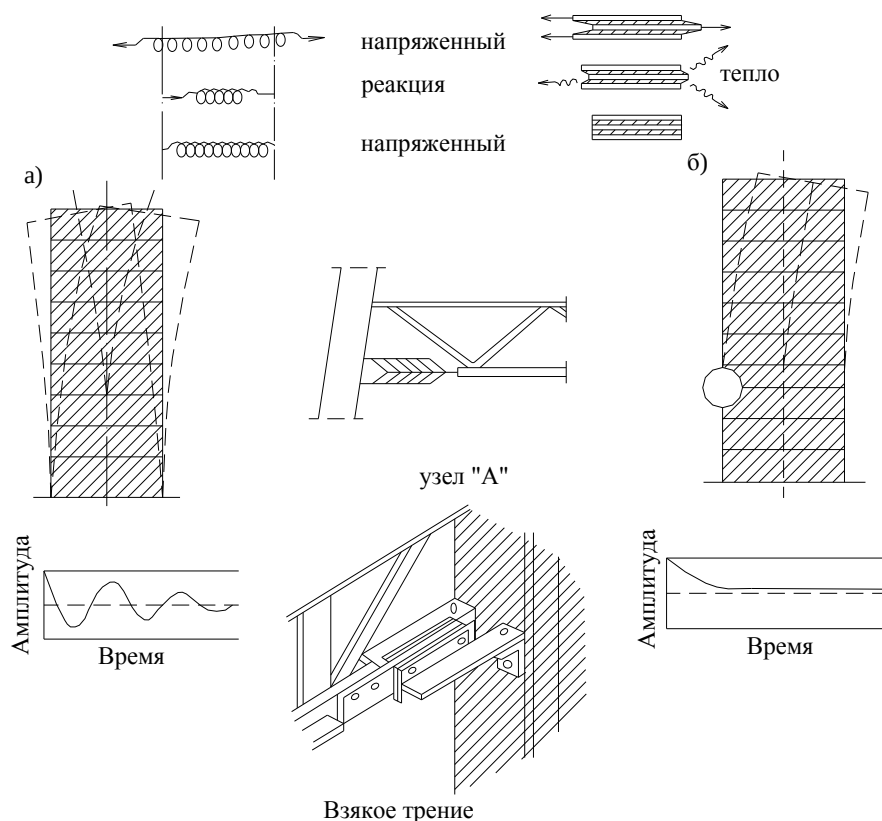


Рис.1.11. Поглотитель энергий в высотном здании

Для улучшения диссипативных характеристик конструкций идея использования несущего высокопрочного болта развивается в работах [26], [47].

1.3.2. Система, реализующая принцип сейсмоизоляции.

Сейсмоизоляция является одним из перспективных способов активной сейсмозащиты. Этот метод заключается в применении основания специальных конструкций, позволяющих уменьшить инерционную динамическую нагрузку на сооружение.

Существуют варианты конструктивных решений сеймовиброизоляции (СВИ) сооружений с гибкими нижними частями несущей конструкции сооружения; системы с кинематической опорой; системы с подвесной опорой; системы со скользящей опорой; системы с упругой опорой.

Реализация СВИ. Здание с гибкими первыми этажами было первой конструктивной реализацией идеи СВИ. Здание опиралось на длинные податливые колонны. Это предложение базировалось на уверенности, что при землетрясении сейсмические реакции здания с гибкими конструктивными

схемами меньше реакций зданий с жесткими конструктивными схемами. Это решение широко применяется во всех странах. Но такие сооружения при сейсмических воздействиях обрушивались из-за недопустимо больших взаимных перемещений колонн. Здание с гибкими первыми этажами может применяться как средство сейсмоизоляции, но только в сочетании с дополнительными сейсозащитными средствами.

Система с кинематической опорой. Предложение о применении опор качения (рис.1.12) разработано в [3] ,[103] , но их использование в практике сейсмозащиты зданий встречается редко.

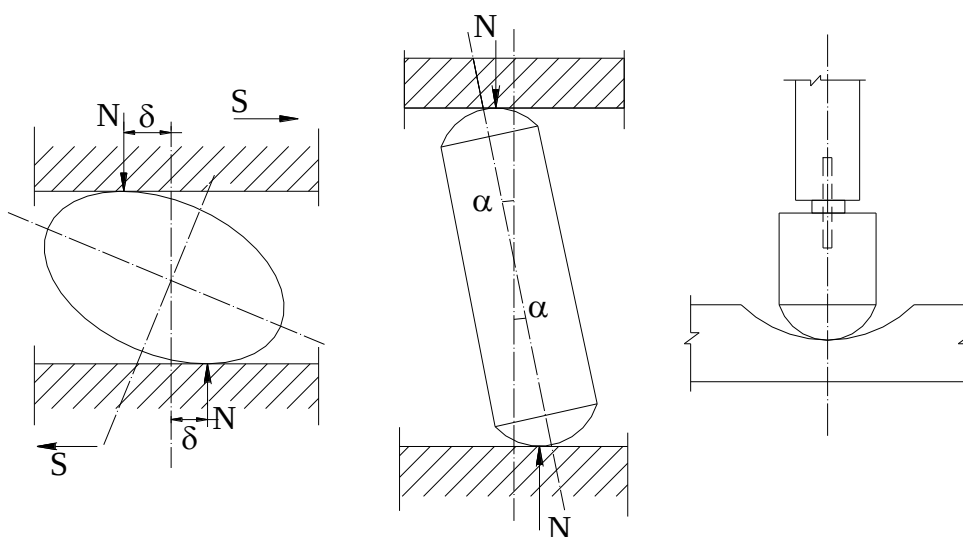


Рис.1.12. Система с кинематической опорой.

Недостаточная изученность поведения такого рода систем при сейсмическом воздействии является главной причиной того, что такие системы применяются при землетрясениях, имеющих доминантный период более 1 сек. Таким образом, эти устройства тоже применяются в сочетании с дополнительными сейсозащитными средствами.

Недостатки данного устройства следующие:

изготовление стойки со сферическим торцом и специальной высокопрочной контактной поверхностью требует соблюдения высокой точности; при наклоне стойки будут возникать существенные местные напряжения, для восприятия которых требуется дополнительная арматура, что приводит к удорожанию устройства вследствие увеличения расхода арматуры. Повышенная точность при

монтаже увеличивает трудоёмкость, что также приводит к существенному увеличению стоимости конструкций.

Система с подвесной опорой. В некоторых зданиях была использована гибкая подвеска (рис.1.13) для уменьшения сейсмических реакций сооружений, но это не принесло ожидаемого эффекта. Эта система чувствительна к любой динамической нагрузке, очень дорога и не надёжна, поэтому не практична.

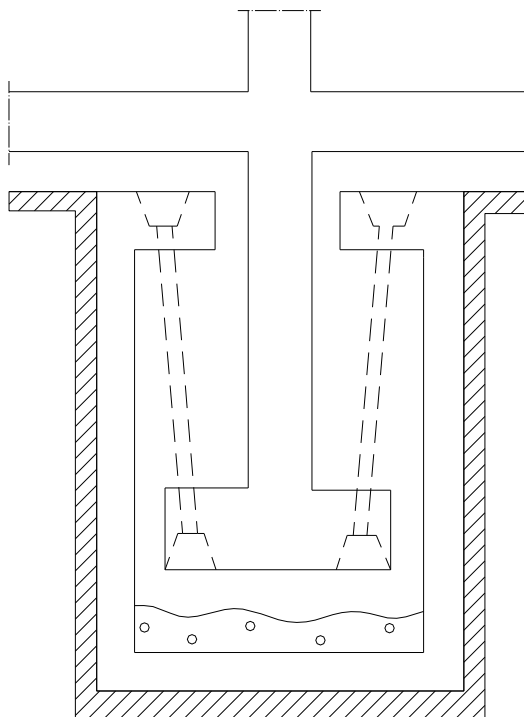


Рис. 1.13. Система с подвесной опорой.

Система со скользящей опорой. Ряд проектов зданий с сейсмоизолирующими скользящими поясами был разработан ЦНИИСК им. Кучеренко В.А. во Фрунзенском политехническом институте. Скользящий пояс включает в себя опоры с пластинами из материала с низкими коэффициентами трения скольжения [100]. При слабых колебаниях ускорение основания передается на сооружение. При повышении ускорения основания сила трения преодолевается, и здание проскальзывает относительно фундамента, что позволит ограничить инерционной силы в вышележащих этажах. Для ограничения взаимного горизонтального перемещения сооружения и фундамента упоры – ограничители вводятся в систему сейсмоизоляции.

Здания со скользящим поясом построены в г.Фрунзе и были произведены испытания, которые подтверждают работоспособность сейсмозащиты в виде сейсмоизолирующих поясов .

[67] .

Такая система была применена в сооружении АЭС “Koeberg” (рис.1.14).

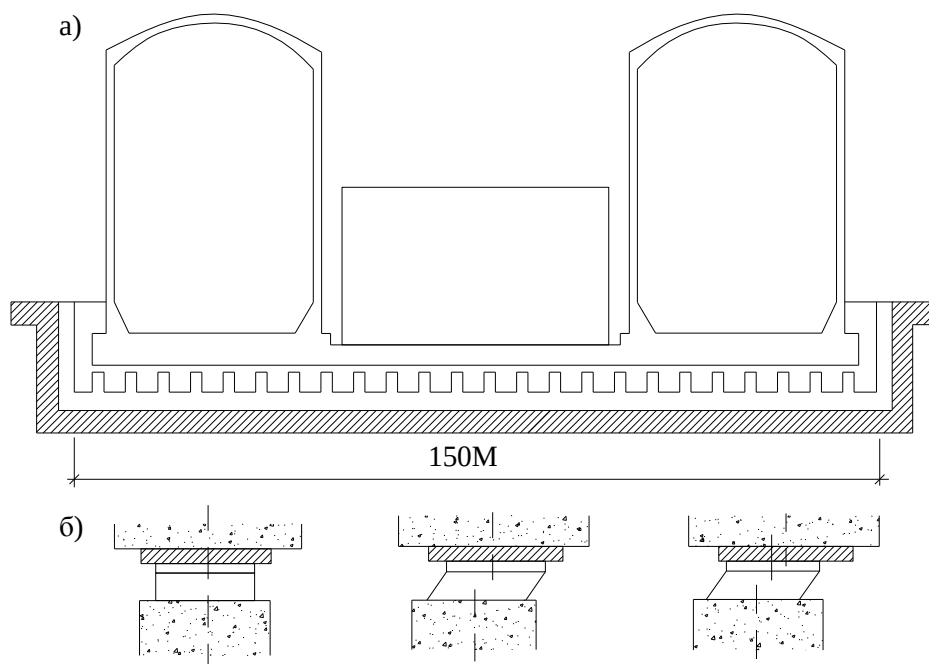


Рис.1.14. Система со скользящей опорой

Система с резинометаллической опорой. Применение резинометаллической опоры имеет широкое распространение во Франции, Англии, Новой Зеландии и США (рис 1.15). Такой тип опор находит всё большее распространение в России для защиты зданий от вибраций [24], [101] и для сейсмоизоляции [4].

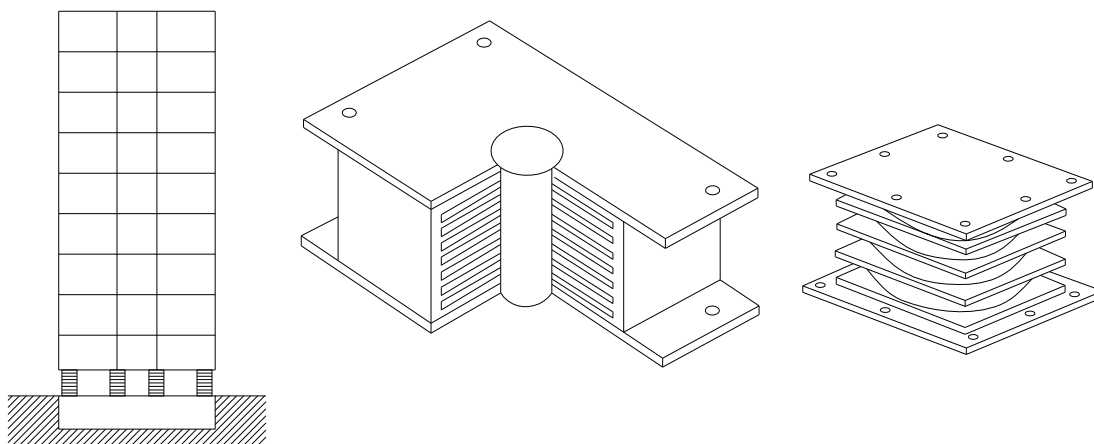


Рис 1.15. Система с резинометаллической опорой.

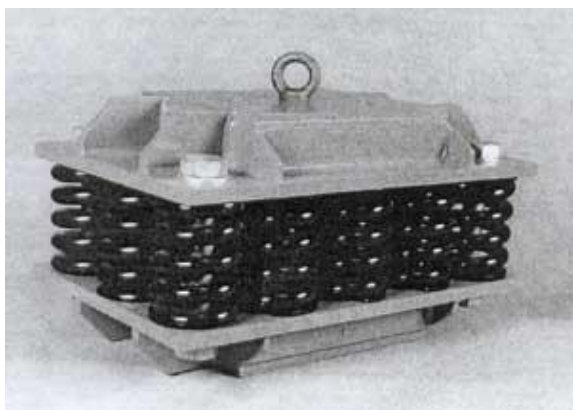
Опоры будут отличаться высокой прочностью при растяжении, сжатии и кручении благодаря упругим свойствам материалов. Срок службы такого устройства достигает 50 лет. Анализ землетрясения в Кобе (Япония) 1995 года показал, что здания с системой сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор не разрушены.

Недостатки этого устройства: необходимо большое количество опор для одного сооружения, а также повышение чувствительности системы к низкочастотному воздействию. Последнее условие требует использовать такое устройство СВИ в сочетании с другими демпфирующими устройствами.

Система с пружинной опорой. Пружинные опоры являются эффективными, хотя и неэкономичными. Немецкая фирма «GERB» является лидером в производстве опор такого типа. Такие элементы давно применяются в мире при виброизоляции сооружений для защиты от сейсмических воздействий.

Система фирмы «GERB» состоит из пружинного элемента. Устройство представлено на рис 1.16.

а)



б)



Рис.1.16. Система с пружинной опорой

Система с пневматической опорой. В конструкторском машиностроении применено амортизированное устройство с большой грузоподъемностью. Это устройство имеет агрегат из пневмоамортизаторов (ПА) (рис 1.17). В данном устройстве может быть от 2-х до 6-ти пневмоамортизаторов. Рациональность и

надежность такого устройства подтверждает безаварийную эксплуатацию пневмоамортизаторов в течение 15 лет на объектах Министерства обороны.

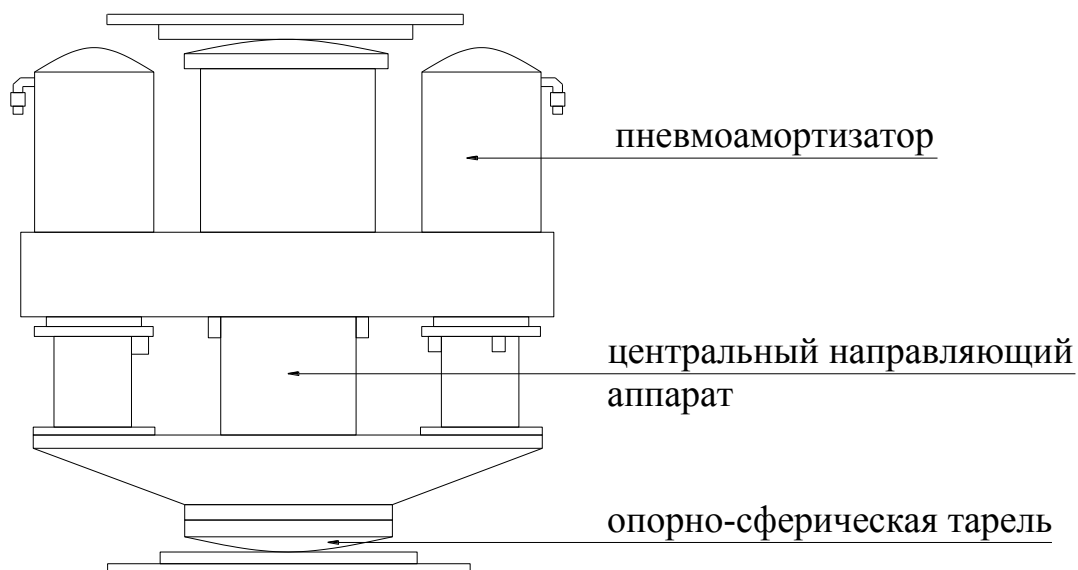


Рис.1.17. Система с пневматической опорой.

ВЫВОД

Проанализировав имеющиеся варианты виброзащиты, пришли к выводу, что для оболочек, состоящих из плоских элементов, рациональнее всего будет применить упругопластические вставки (УПВ), поскольку при колебаниях в стыках плоских элементов складчатой оболочки возникают сдвиговые усилия. Если мы поставим УПВ в стыках, то они будут обеспечивать сдвиговую податливость. Также при вынужденных колебаниях вставка будет играть роль демпфера.

ГЛАВА II

АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОДЫ РАСЧЁТА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ ПОЛОГИХ СКЛАДЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК

2.1. Алгоритмы определения частот свободных колебаний пологих гладких и складчатых оболочек

Для определения места положения элементов сейсмозащиты необходимо выявить опасные сечения оболочки, где возникают взаимные повороты плоских элементов оболочки при колебаниях и при каких условиях возникают минимальные частоты. Для достижения этой цели разработаем алгоритм расчета и математическую модель оболочки и определим зависимости частот свободных колебаний от различных параметров.

Частоты свободных колебаний гладких оболочек определены в [15]. Методика определения частот свободных колебаний пологих складчатых и гладких оболочек на прямоугольном плане предложена в работе [41].

На основе методик [15] и [41] построен алгоритм расчета частот свободных колебаний пологих гладких (рис.2.1, а) и складчатых оболочек (рис.2.1, б). Использование алгоритма позволяет определить зависимость частоты колебаний от значений волновых чисел m и n , от геометрических параметров квадратных или прямоугольных в плане оболочек, от количества изломов поверхности k и l в направлениях осей x и y и других факторов.

Современный уровень развития компьютерной техники и программирования позволяет решить указанные задачи быстрее. Однако для оценки достоверности численного метода необходимо сравнить результаты с результатами, полученными аналитическим методом. Выполнение сравнения результатов расчета этими методами позволяет говорить о достоверности разработанного метода.

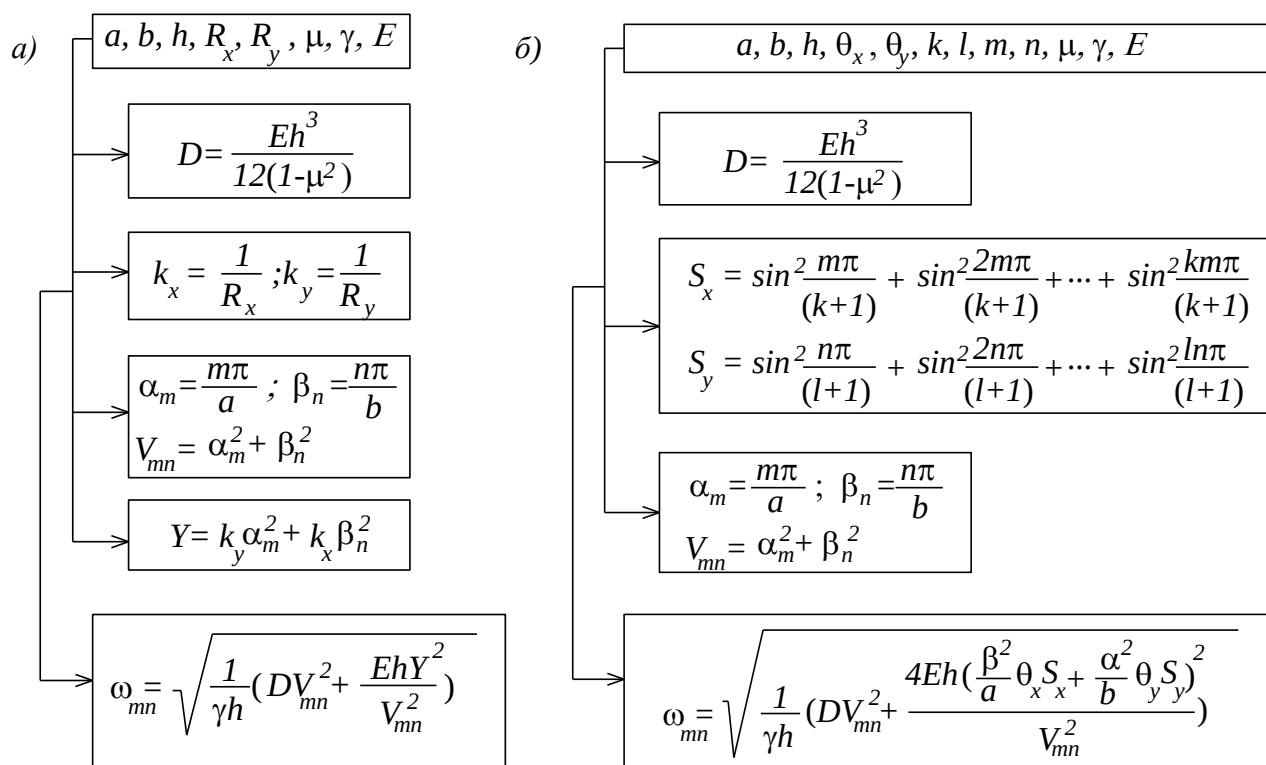
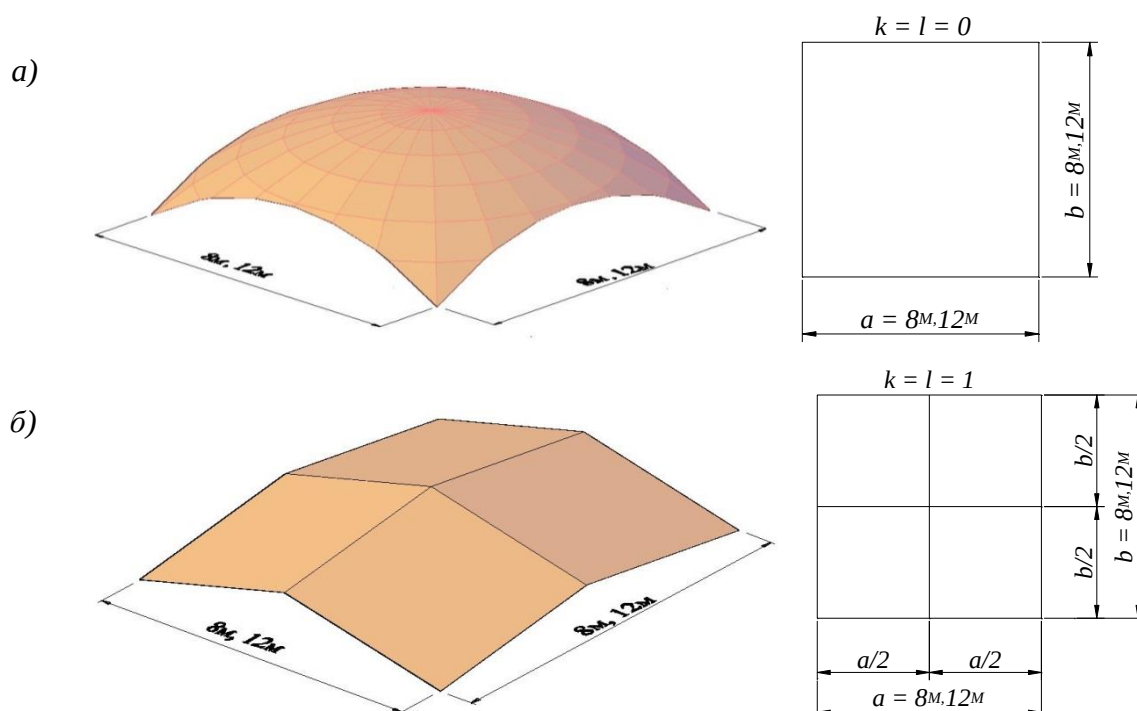


Рис.2.1 Алгоритм определения частоты свободных колебаний пологой оболочки:

а) гладкая; б) складчатая

2.2. Разработка математических моделей складчатой полой оболочкой на квадратном плане.

Для исследований разработаны математические трехмерные модели тонких полых складчатых на квадратном плане (рис. 2.2).



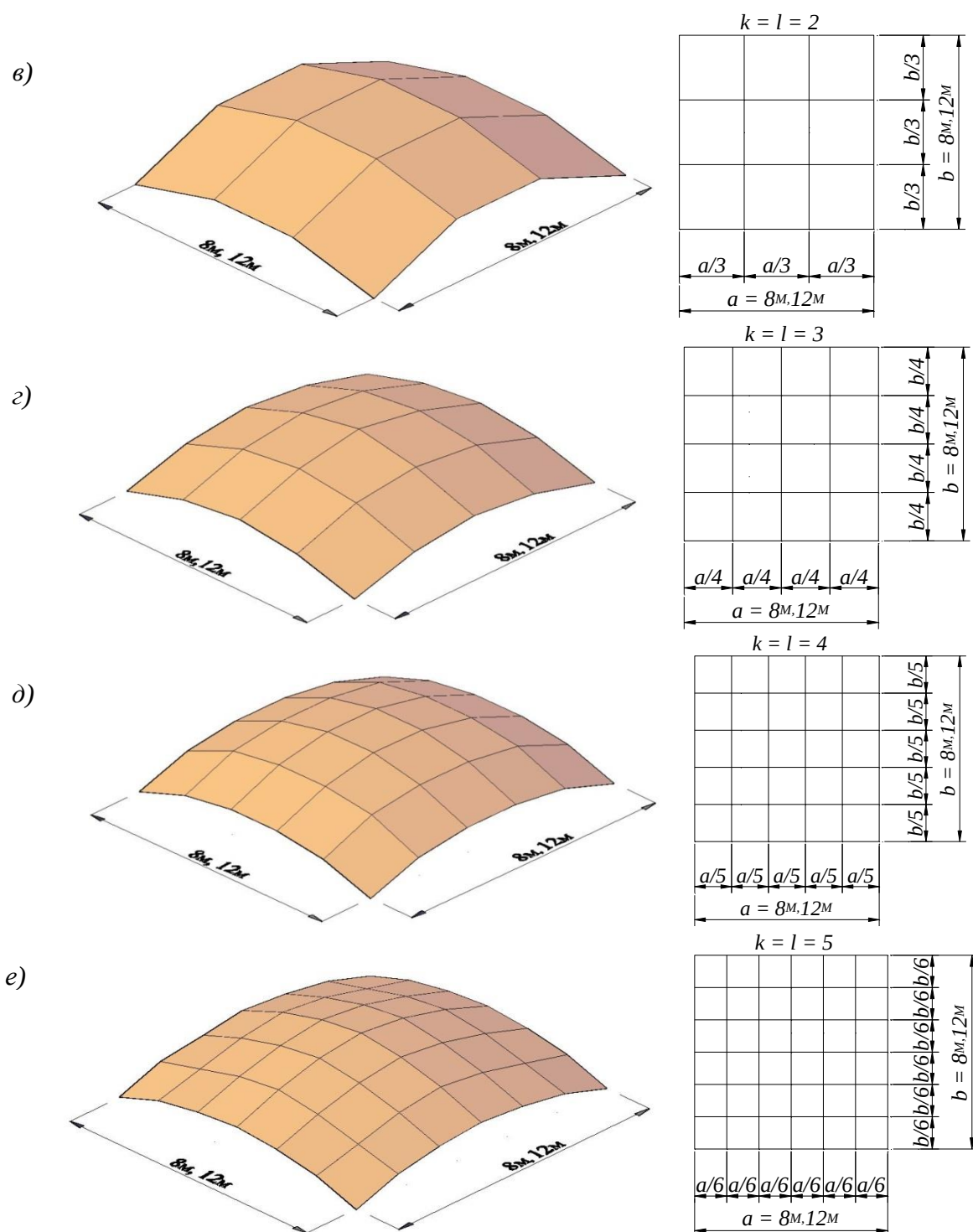


Рис.2.2. Трехмерные модели квадратных в плане оболочек и их проекций

2.3. Определение зависимости частот свободных колебаний пологих складчатых оболочек на квадратном плане от различных параметров.

Используем алгоритм рис.2.1 и математические модели (рис.2.2) для исследования частот свободных колебаний шарнирно опертых на краях

квадратных в плане пологих оболочек с симметричной раскладкой плоских плит и одинаковыми проекциями этих плит на горизонтальную плоскость.

В качестве объектов исследования рассмотрим квадратные в плане железобетонные шарнирно опертые тонкие пологие оболочки с размерами в плане 8х8м и 12х12м с различным количеством изломов $k = l = 0, 1, 2, 3, 4, 5$.

Для всех оболочек принимаем одинаковыми: удельный вес материала (железобетон) $\gamma = 2400 \text{ кг/м}^3$; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$. Стрела подъема для оболочки 8х8м равна $f = 1,6\text{м}$ и для оболочки 12х12м $f_1 = 2,4\text{м}$.

Результаты определения частот свободных колебаний квадратных в плане гладких и складчатых оболочек разной толщины с различными волновыми числами и количеством изломов, вычисленных аналитическим методом с помощью программы «MathCAD», сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Частоты свободных колебаний, полученные аналитическим методом

Оболочка 8х8м												
$m = n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k = l = 0$	63.9	65.2	70.4	82.8	104.2	134.7	173.7	220.4	274.5	335.8	403.9	478.9
$k = l = 1$	46.2	13.2	54.8	52.7	94.4	118.7	168.0	211.0	271.0	329.6	401.5	474.7
$k = l = 2$	51.2	52.8	29.7	73.4	97.0	118.7	169.4	217.1	267.0	333.6	402.1	474.7
$k = l = 3$	44.2	46.0	53.2	52.7	93.5	126.6	167.4	211.0	270.6	332.6	401.3	474.7
$k = l = 4$	55.2	56.7	62.6	76.3	82.4	130.8	170.7	218.0	272.6	329.6	402.6	477.9
$k = l = 5$	54.2	55.7	61.7	75.6	98.6	118.7	170.3	217.8	272.4	334.0	402.5	474.7

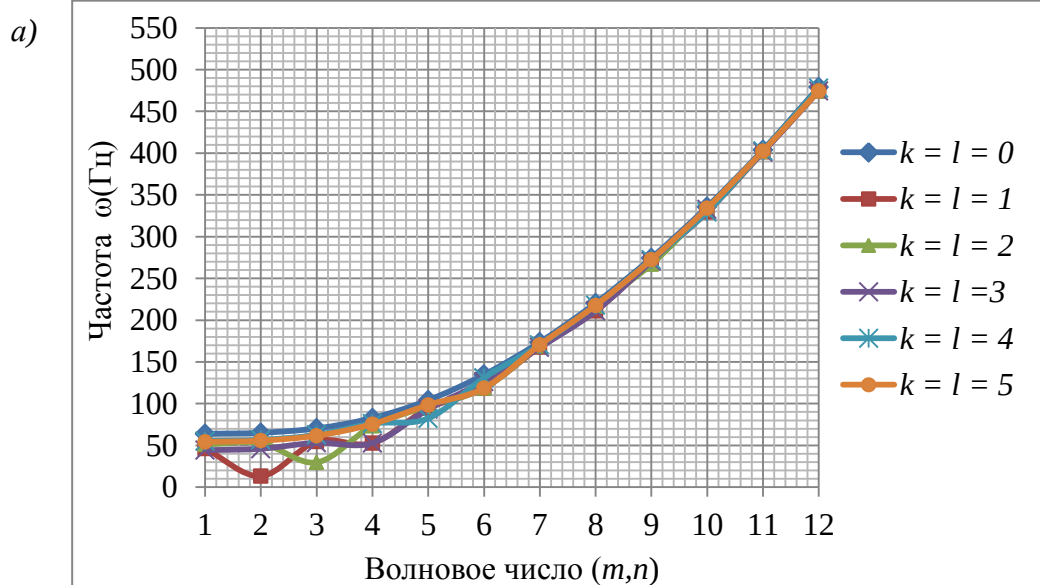
Оболочка 12х12 м												
$m = n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k = l = 0$	46.0	46.3	47.8	51.6	58.8	69.9	85.2	104.4	127.3	153.5	183.1	215.9
$k = l = 1$	30.8	5.9	33.4	23.4	47.8	52.7	78.1	93.8	122.6	146.5	179.9	211.0
$k = l = 2$	34.1	34.6	13.2	41.4	50.0	52.7	79.5	99.8	118.7	150.4	180.5	211.0
$k = l = 3$	29.4	30.0	32.2	23.4	47.0	60.4	77.6	93.8	122.3	149.4	179.7	211.0
$k = l = 4$	36.8	37.2	39.0	43.6	36.6	64.3	80.6	100.7	124.2	146.5	181.0	214.1

$k = l = 5$	36.1	36.6	38.4	43.0	51.4	52.7	80.3	100.5	124.0	150.9	180.9	211.0
-------------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------

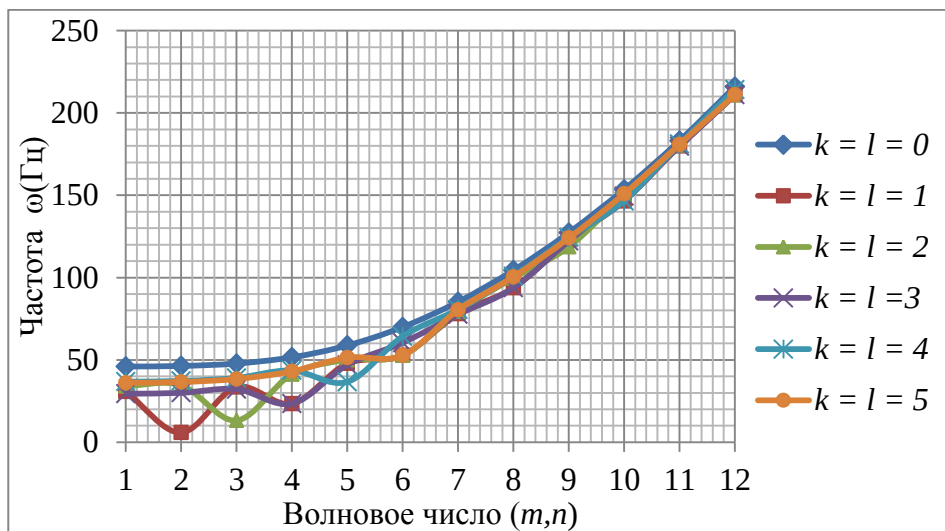
Оболочка 8x8 м при $k = l = 2$												
$m = n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$h = 0.08$ м	51.2	52.8	29.7	73.4	97.0	118.7	169.4	217.1	267.0	333.6	402.1	474.7
$h = 0.09$ м	51.3	53.2	33.4	78.3	105.9	133.5	188.8	242.8	300.4	374.3	451.6	534.0
$h = 0.1$ м	51.3	53.7	37.1	83.4	115.0	148.3	208.3	268.6	333.8	415.2	501.2	593.3

Оболочка 12x12 м при $k = l = 2$												
$m = n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$h = 0.08$ м	49.3	50.1	23.7	62.6	75.1	84.4	139.6	171.4	209.6	252.6	304.7	356.3
$h = 0.09$ м	49.8	50.9	25.8	68.5	84.7	95.5	158.3	193.2	230.2	290.4	352.8	410.3
$h = 0.1$ м	50.1	51.3	27.4	71.3	94.8	118.1	168.6	216.3	266.7	331.8	401.2	473.8

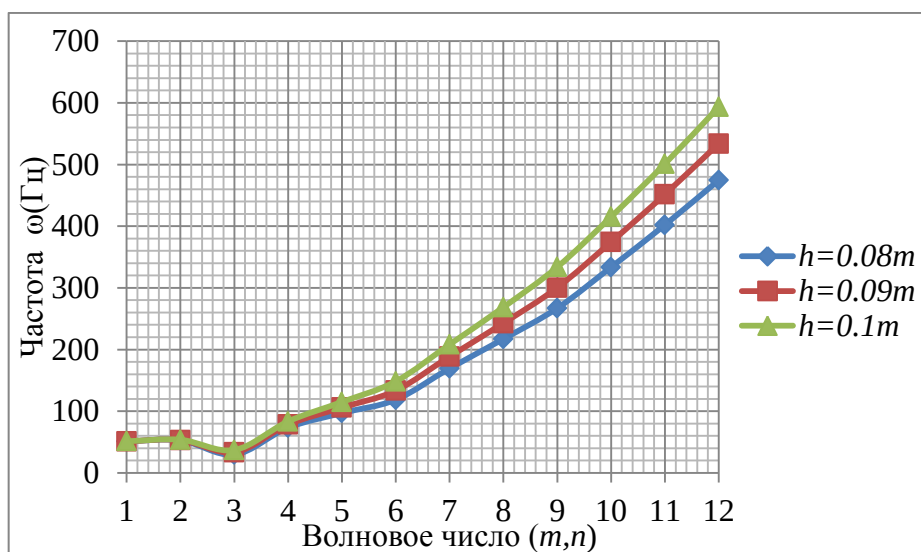
По результатам таблицы 1 построены графики зависимости частот свободных колебаний квадратных в плане гладких и складчатых оболочек от волновых чисел, количества изломов, толщины и размеров оболочки в плане (рис.2.3).



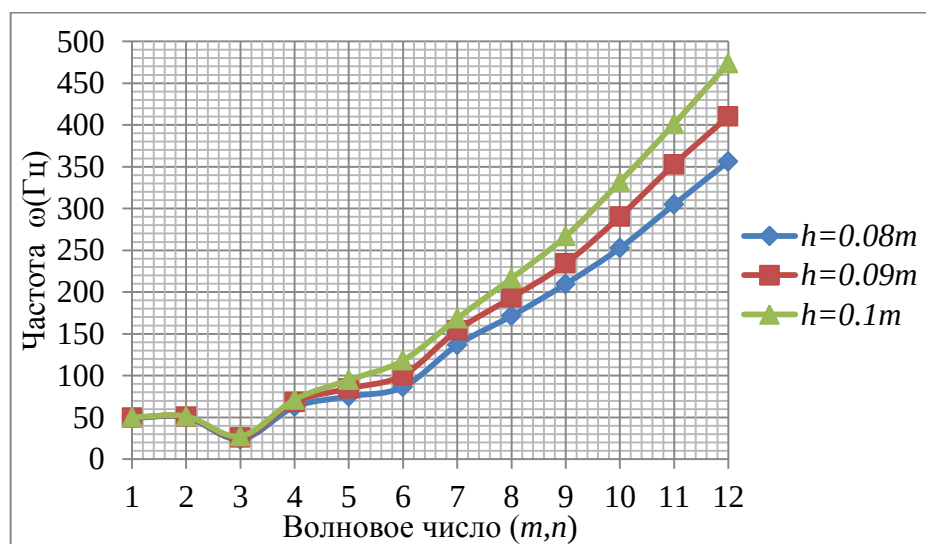
б)



в)



г)



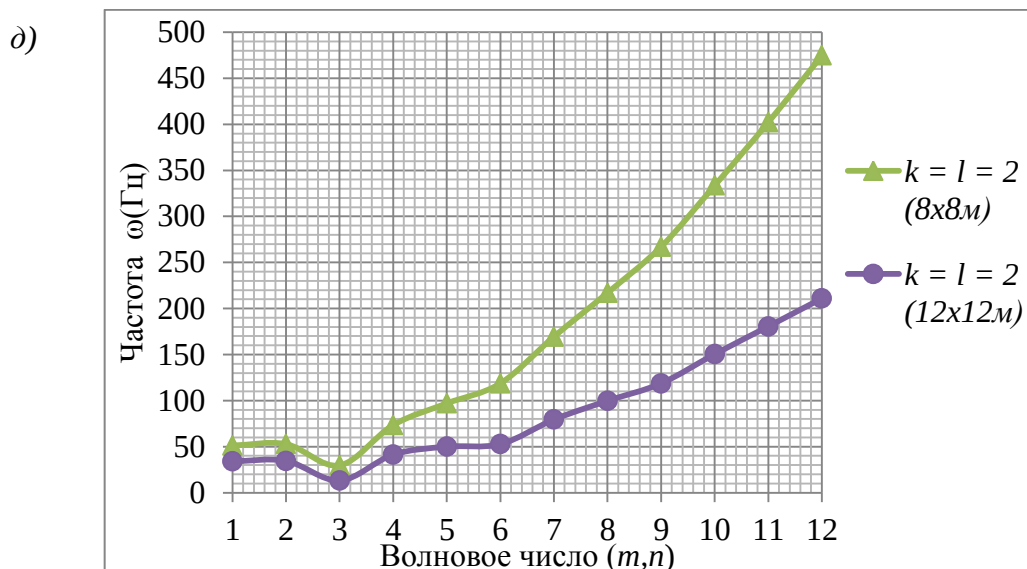
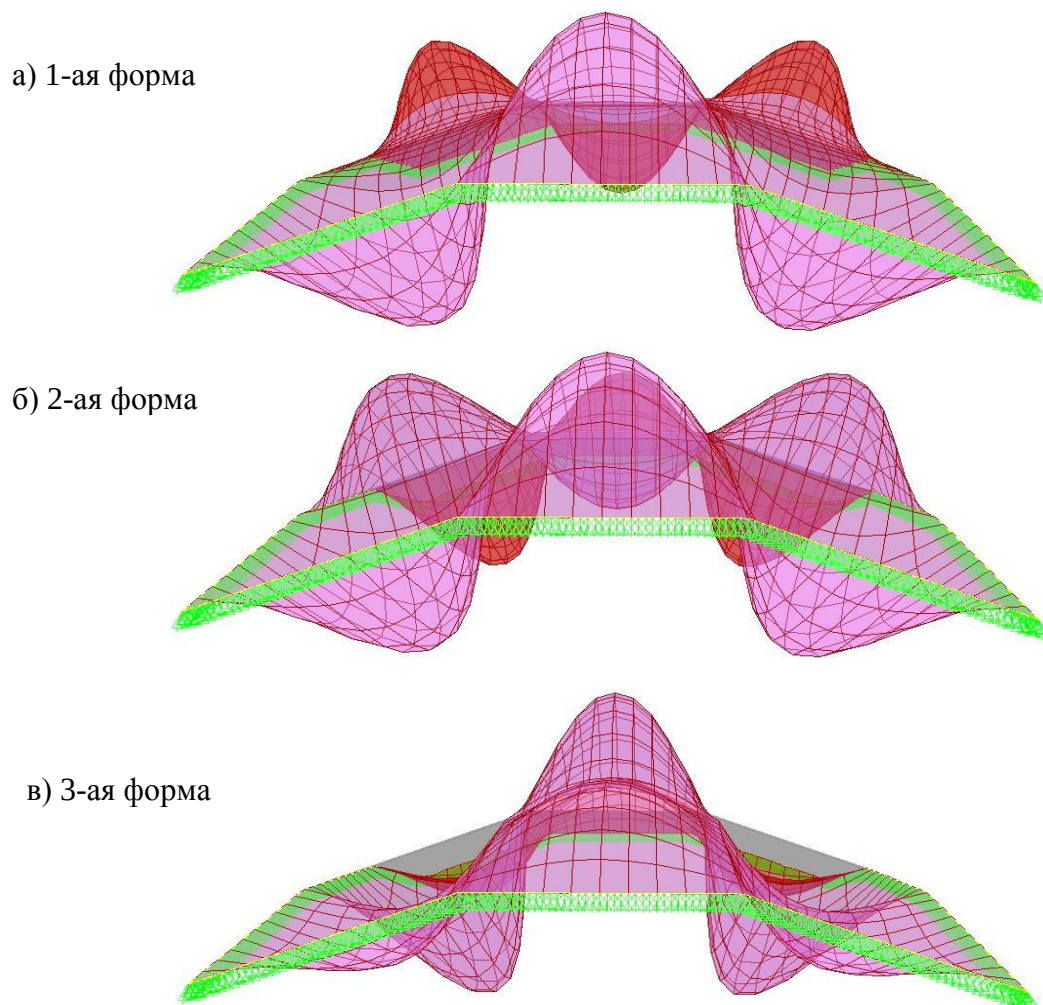


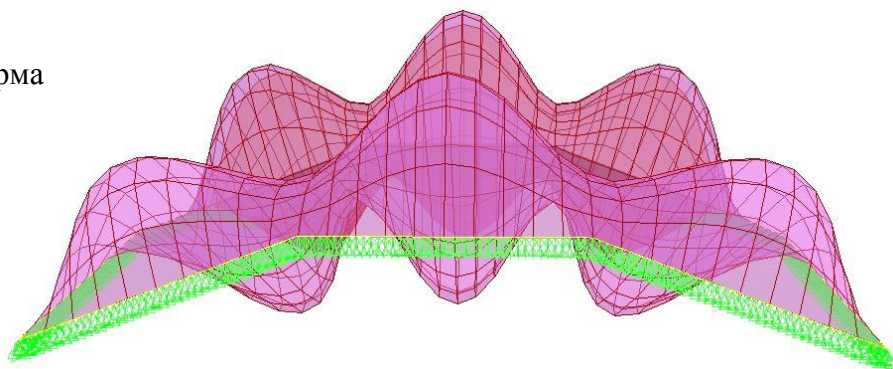
Рис. 2.3. Зависимости частоты свободных колебаний квадратных в плане оболочек от различных параметров, полученных аналитическим методом:

а, в) оболочка 8 х 8 м; б, г) оболочка 12 х 12 м; д) оболочка 8 х 8 м и 12х12м.

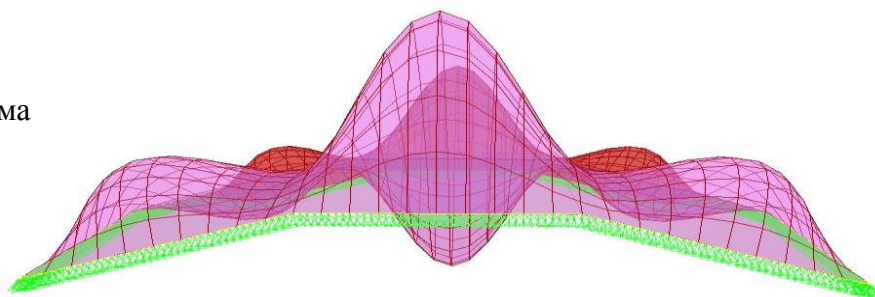
На рис. 2.4 показаны формы колебаний складчатых оболочек с двумя изломами.



г) 4-ая форма



д) 5-ая форма

Рис. 2.4. Формы колебаний складчатых оболочек с двумя изломами в направлениях осей x и y

На основе анализа графиков (рис.2.3), сделаны следующие выводы:

- если число изломов $k = l = 3$ и менее трех, то минимальная частота возникает при $m = k + 1$, $n = l + 1$, поэтому опасными будут сечения в стыках плоских элементов, где происходит взаимный поворот плоских элементов и возникают сдвиговые деформации;
- если число изломов более трех, то минимальная частота возникает при $m = 1$ и $n = 1$ и в центральном сечении сдвиговые деформации не возникают.
- минимальная частота свободных колебаний снижается при уменьшении числа изломов, уменьшении толщины оболочки и увеличении размеров оболочки в плане, поэтому необходимость в постановке демпфирующих элементов возрастает.

2.4. Разработка математических моделей складчатой полой оболочки на прямоугольном плане.

Для исследований разработаны математические трехмерные модели тонких полых складчатых на прямоугольном плане (рис. 2.5).

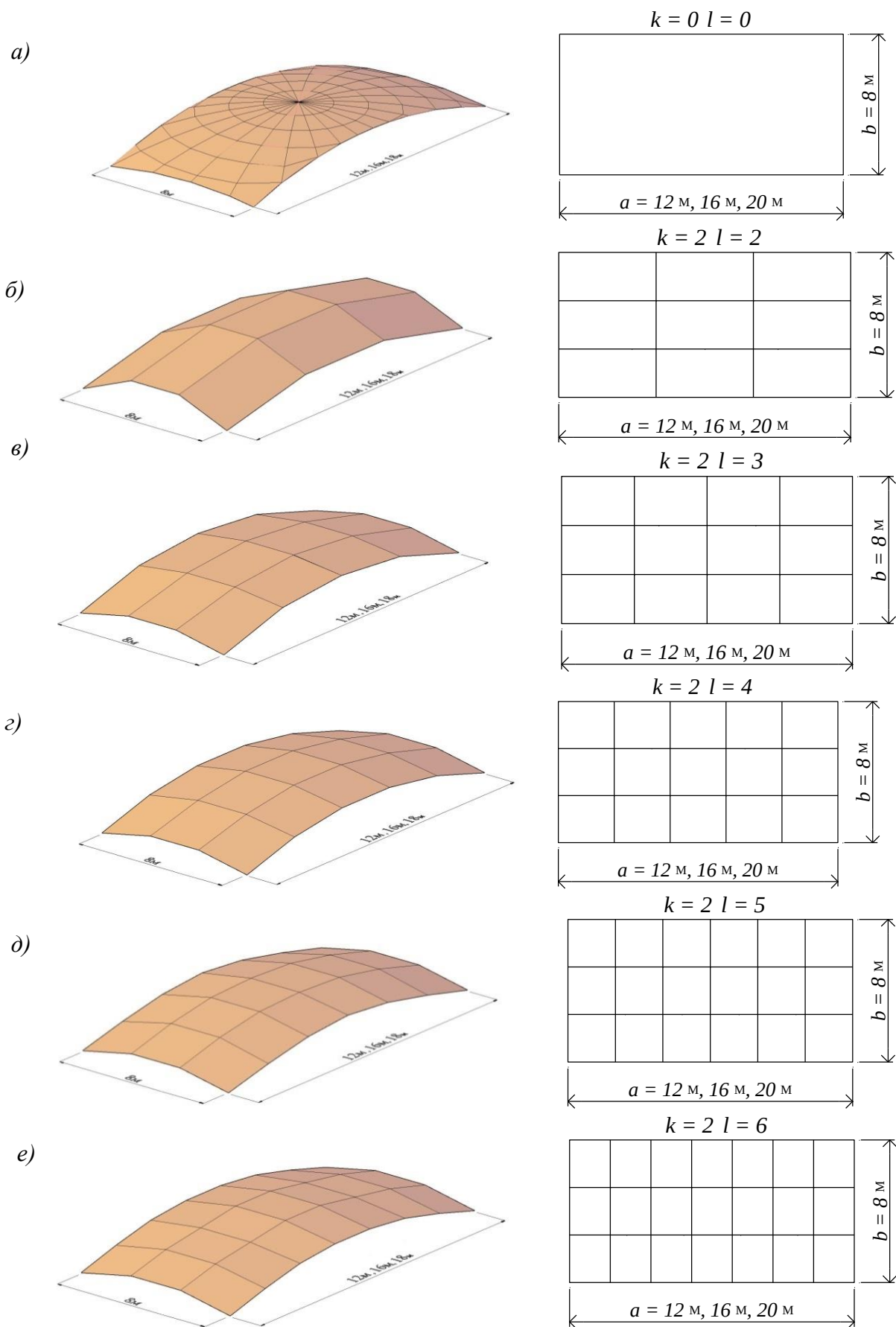


Рис. 2.5. Трехмерные модели квадратных в плане оболочек и их проекций

a – гладкая оболочка; $\bar{b}$, $\bar{v}$, $\bar{z}$, $\bar{d}$, $\bar{e}$ – складчатые оболочки.

2.5. Определение зависимости частот свободных колебаний пологих складчатых оболочек на прямоугольном плане от различных параметров.

Используем алгоритм (рис.2.1) и математические модели (рис.2.5) для исследования частот свободных колебаний шарнирно опертых на краях прямоугольных в плане пологих оболочек с симметричной раскладкой плоских плит и одинаковыми проекциями этих плит на горизонтальную плоскость.

Для определения места положения элементов сейсмозащиты необходимо выявить опасные сечения оболочки, где возникают взаимные повороты плоских элементов оболочки при колебаниях и при каких условиях возникают минимальные частоты. Для этого определим зависимости частот свободных колебаний от количества изломов поверхности k и l в направлениях осей x и y , волновых чисел m и n , от геометрических размеров и других параметров.

В качестве объектов исследования рассмотрим прямоугольные в плане железобетонные шарнирно опертые тонкие пологие гладкие и складчатые оболочки с размерами в плане 8x12, 8x16 и 8x20 м при $k = 0, 2$ и $l = 0, 2, 3, 4, 5, 6$.

Для всех оболочек принимаем одинаковыми: толщину оболочки для гладкой и плиты для складчатой стрела подъема $f = 1,6$ м; удельный вес материала $\gamma = 2400$ кг/м³; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$. Величины изломов углов показаны в таблице 2.2

Таблица 2.2

Величины изломов углов

Количество изломов	Оболочка 8x12м		Оболочка 8x16м		Оболочка 8x20м	
	Θ_x	Θ_y	Θ_x	Θ_y	Θ_x	Θ_y
$k = 2; l = 2$	$17\pi/180$	$15\pi/180$	$17\pi/180$	$12\pi/180$	$17\pi/180$	$9\pi/180$
$k = 2; l = 3$	$17\pi/180$	$10\pi/180$	$17\pi/180$	$9\pi/180$	$17\pi/180$	$7\pi/180$
$k = 2; l = 4$	$17\pi/180$	$8\pi/180$	$17\pi/180$	$8\pi/180$	$17\pi/180$	$5\pi/180$
$k = 2; l = 5$	$17\pi/180$	$7\pi/180$	$17\pi/180$	$6\pi/180$	$17\pi/180$	$4\pi/180$
$k = 2; l = 6$	$17\pi/180$	$7\pi/180$	$17\pi/180$	$7\pi/180$	$17\pi/180$	$5\pi/180$

Результаты определения частот свободных колебаний прямоугольных в плане гладких и складчатых оболочек с различными волновыми числами и количеством изломов, вычисленных аналитическим методом, сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

Частоты свободных колебаний, полученные аналитическим методом

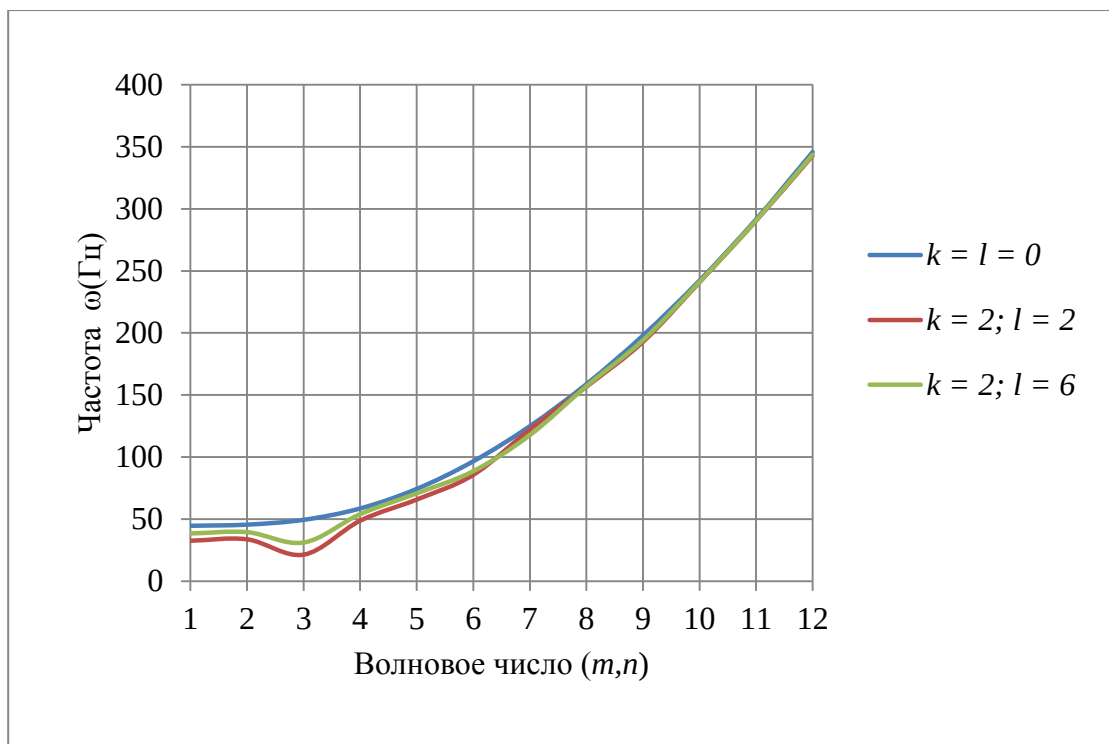
Оболочка 8x12м												
$m = n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k = 0; l = 0$	44.7	45.6	49.5	58.7	74.4	96.6	124.9	158.8	197.9	242.2	291.5	345.7
$k = 2; l = 2$	36.6	37.8	21.4	52.8	69.8	85.7	122.2	156.7	192.8	240.9	290.4	342.8
$k = 2; l = 3$	34.3	35.5	28.3	41.2	68.7	87.7	121.6	153.2	193.7	240.5	290.1	342.8
$k = 2; l = 4$	34.3	35.5	28.3	51.2	61.6	87.7	121.6	156.2	193.7	238.6	290.1	343.3
$k = 2; l = 5$	35.2	36.4	28.9	51.8	69.1	85.7	121.8	156.4	193.8	240.7	290.2	342.8
$k = 2; l = 6$	38.5	39.6	31.2	54.1	70.8	88.7	117.7	157.1	194.2	241.1	290.6	343.6

Оболочка 8x16м												
$m = n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k = 0; l = 0$	44.7	45.4	48.3	55.5	68.1	86.6	110.4	139.2	172.7	210.8	253.2	300
$k = 2; l = 2$	24.7	26	18.5	41.2	57.1	74.2	103.9	134.1	166.9	207.5	250.5	296.7
$k = 2; l = 3$	24.7	26	23.5	34.5	57.1	75.6	103.9	132.3	167.5	207.5	250.5	296.7
$k = 2; l = 4$	26.3	27.5	24.5	42.2	52.5	75.9	104.3	134.4	167.6	206.3	250.7	297.1
$k = 2; l = 5$	24.7	26	23.5	41.2	57.1	74.2	103.9	134.1	167.5	207.5	250.5	296.7
$k = 2; l = 6$	29.9	31	27	44.5	59.5	76.7	101.5	135.2	168	208.2	251.1	297.3

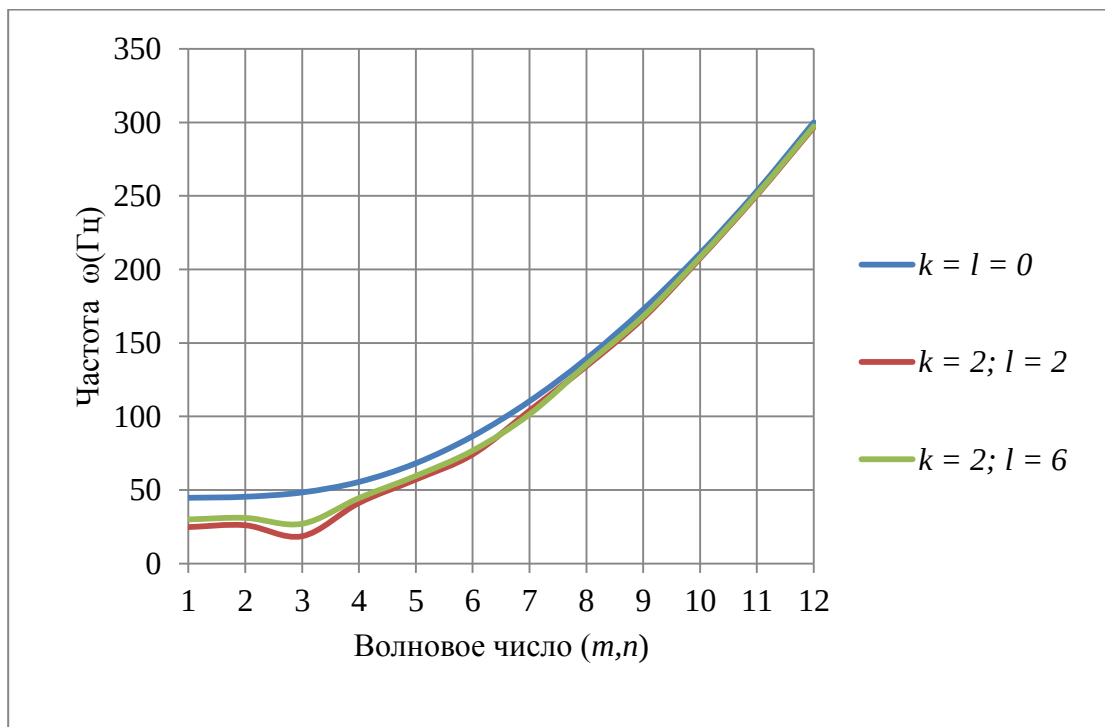
Оболочка 8x20м												
$m = n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k = 0; l = 0$	44.7	45.3	47.8	54.1	65.4	82	103.8	130.2	161.2	196.3	235.6	278.9
$k = 2; l = 2$	16.5	18.1	17.2	34.7	50.5	68.8	95.1	123.5	154.9	191.9	231.9	275.3
$k = 2; l = 3$	16.8	18.4	19.7	31.4	50.6	69.5	95.2	122.6	155.2	191.9	231.9	275.3
$k = 2; l = 4$	15.8	17.5	19.3	34.4	48.3	69.4	95	123.4	155.1	191.3	231.9	275.4
$k = 2; l = 5$	15.5	17.2	19.1	34.2	50.2	68.8	94.9	123.3	155.1	191.8	231.8	275.3
$k = 2; l = 6$	19.2	20.6	21	36.1	51.5	69.9	94	123.9	155.3	192.1	232.1	275.6

По результатам таблицы 2 построены графики зависимостей частот свободных колебаний от различных параметров (рис. 2.6).

а)



б)



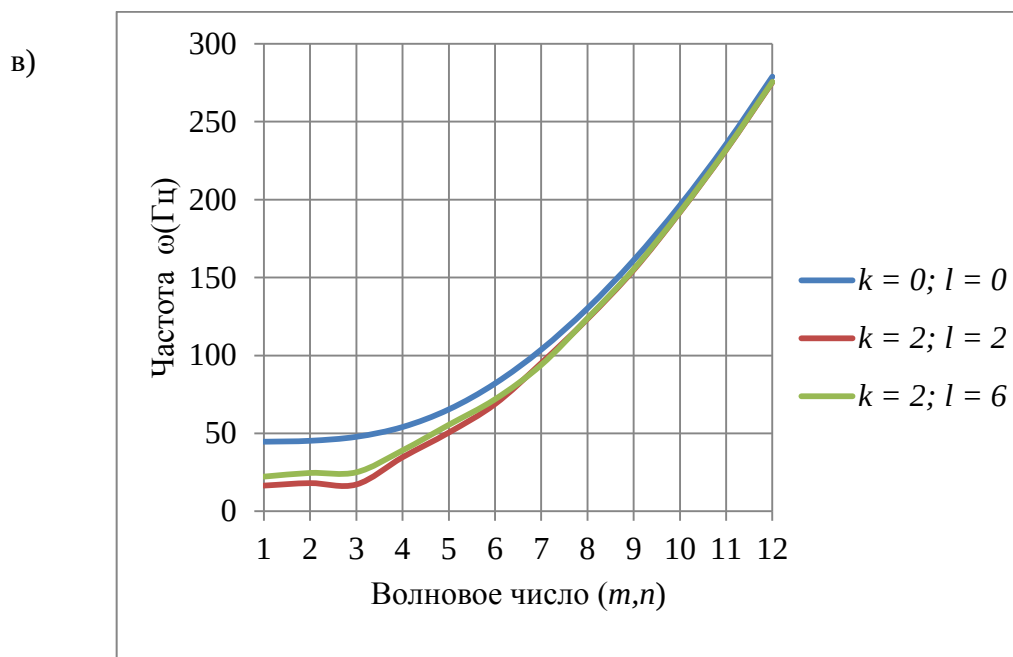


Рис. 2.6. Зависимости частот свободных колебаний от различных параметров
 а - оболочка 8 x 12 м; б - оболочка 8 x 16 м; в - оболочка 8 x 20 м

Получены зависимости частот свободных колебаний оболочек с двумя изломами в направлениях осей x и y от изменения размеров оболочки в плане (рис.2.7).

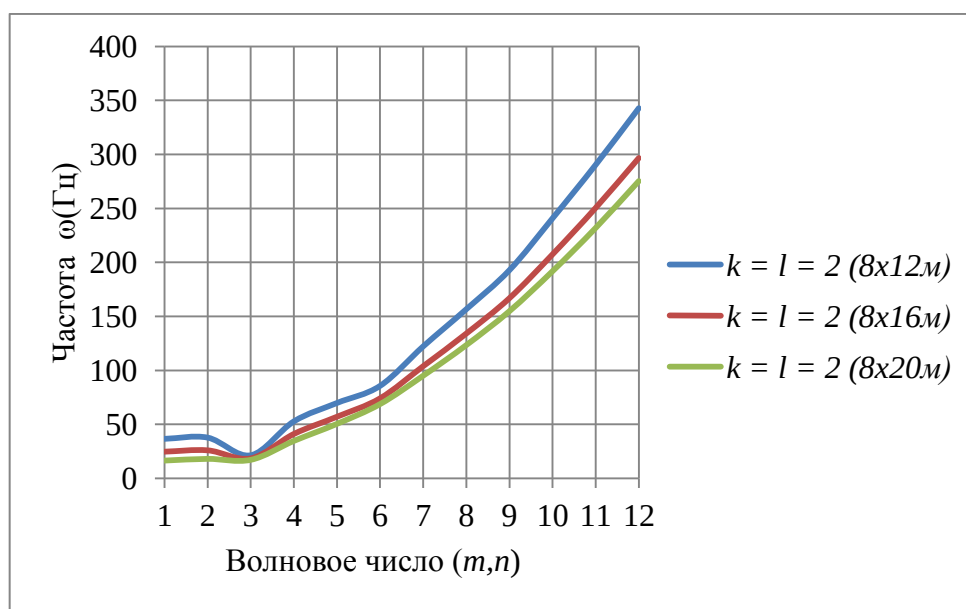
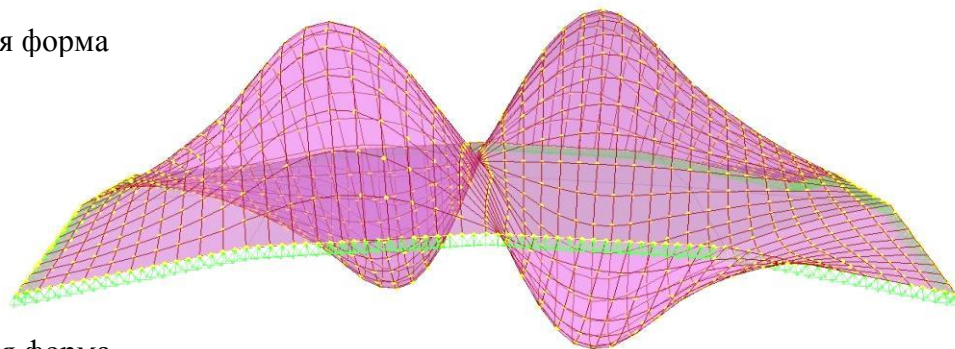


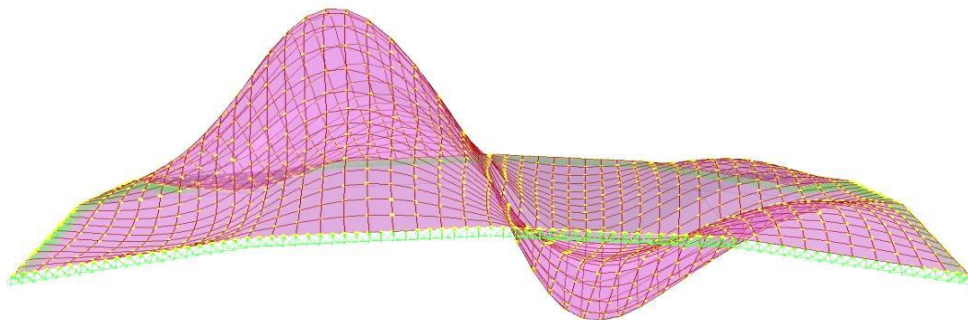
Рис.2.7. Зависимости частот свободных колебаний от размеров оболочки в плане

На рис.2.8 показаны формы свободных колебаний складчатых оболочек 8x16м ($k=2, l=4$).

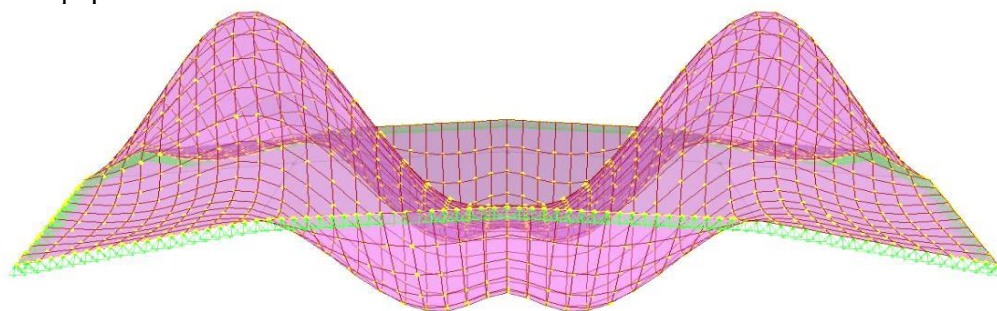
а) 1-ая форма



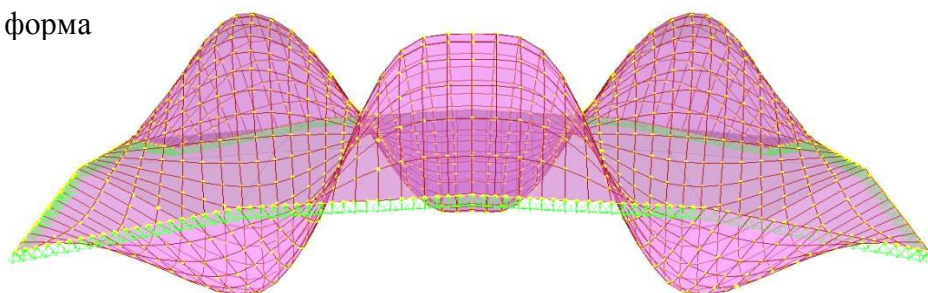
б) 2-ая форма



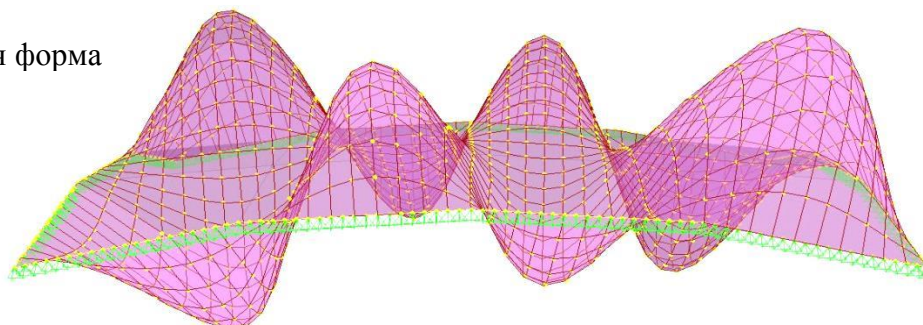
в) 3-ая форма



г) 4-ая форма



д) 5-ая форма

Рис.2.8. Форма колебания складчатых оболочек 8x16м ($k = 2$; $l = 4$)

На основе анализа графиков (рис.2.7 и рис.2.8) сделаны следующие выводы:

- для оболочки с соотношением $a/b \leq 2$:
 - при $k = 1; l \geq 1$ минимальная частота возникает при $m = n = 2$;
 - при $k = 2; l = 1$ минимальная частота возникает при $m = 3, n = 2$;
 - при $k = 2; l \geq 2$ минимальная частота возникает при $m = 3, n = 3$;
 - при $k = 3; l = 1$ минимальная частота возникает при $m = 2, n = 2$;
 - при $k \geq 3; l \geq 2$ минимальная частота возникает при $m = 2, n = 1$;
- для оболочки с соотношением $a/b > 2$ минимальная частота свободных колебаний возникает в форме, где $m = 1$ и $n = 1$;

2.6. Анализ сравнительных результатов, полученных аналитическим и численным методом.

Для проверки возможности использования аналитического и численного методов определим частоты свободных колебаний двумя методами. Сравнение результатов расчета минимальной частоты свободных колебаний пологих складчатых оболочек на квадратном плане приведено в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Минимальные частоты, полученные аналитическим методом ω_1 и разработанным численным методом ω_2 .

Количество изломов k, l	Оболочка 8x8м		Отклонение, %	Оболочка 12x12м		Отклонение, %
	$\omega_1 (Гц)$	$\omega_2 (Гц)$		$\omega_1 (Гц)$	$\omega_2 (Гц)$	
$k = l = 0$	63.9	62.8	1.72	46	43.22	6.04
$k = l = 1$	13.2	12.49	5.38	5.9	5.56	5.76
$k = l = 2$	29.7	27.43	7.64	13.2	12.19	7.65
$k = l = 3$	44.2	45.32	2.47	29.4	28.31	3.71
$k = l = 4$	55.2	54.21	1.79	36.8	35.12	4.57
$k = l = 5$	54.2	55.34	2.06	36.1	35.89	0.59

Максимальное отклонение минимальной частоты, вычисленной аналитическим методом и разработанным численным методом, составляет 7.65%,

что позволяет сделать вывод, что результаты согласуются удовлетворительно, поэтому можно говорить о достоверности разработанного численного метода.

Для проверки возможности использования аналитического и численного методов для расчета оболочек на прямоугольном плане определим частоты свободных колебаний двумя методами. Сравнение результатов расчета минимальной частоты свободных колебаний пологих складчатых оболочек на прямоугольном плане приведено в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Минимальные частоты, полученные аналитическим методом ω_1 и
разработанным численным методом ω_2

Количество изломов k, l	Оболочка 8x12м		Отклон ение, %	Оболочка 8x16м		Отклон ение, %	Оболочка 8x20м		Отклон ение, %
	$\omega_1(\Gamma\text{ц})$	$\omega_2(\Gamma\text{ц})$		$\omega_1(\Gamma\text{ц})$	$\omega_2(\Gamma\text{ц})$		$\omega_1(\Gamma\text{ц})$	$\omega_2(\Gamma\text{ц})$	
$k = 0; l = 0$	44.7	41.67	6.78	44.7	42.65	4.59	44.7	41.65	6.82
$k = 2; l = 2$	21.4	20.62	3.64	18.5	17.74	4.11	16.5	15.49	6.12
$k = 2; l = 6$	31.2	30.47	2.34	27	26.94	0.22	19.2	20.24	5.14

Для прямоугольного плана максимальное отклонение минимальной частоты, вычисленной аналитическим методом и разработанным численным методом, составляет 6.82%, что позволяет сделать вывод, что результаты согласуются удовлетворительно, поэтому можно говорить о достоверности разработанного численного метода.

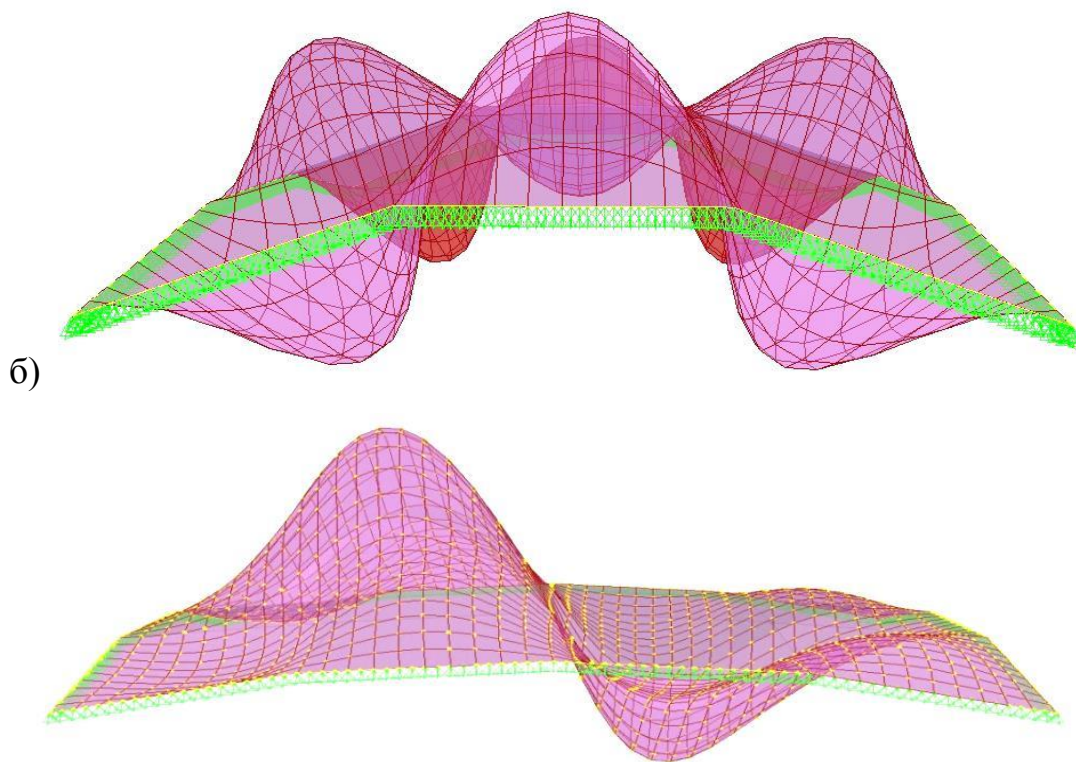
ГЛАВА III

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОЛОЖЕНИЯ УПВ В ПОЛОГОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБОЛОЧКЕ

3.1. Обоснование подбора места расположения УПВ в складчатой оболочке

Определение места положения сдвиговой упругопластической вставки (УПВ) в складчатой оболочке основано на выявлении условий возникновения минимальных частот и определения опасных сечений оболочки с максимальными сдвиговыми усилиями, возникающими при колебаниях. Результаты исследования в главе 2 показали, что при колебаниях в стыках возникает поворот плоских элементов, поэтому стыки между плитами могут быть разрушены при сейсмических воздействиях. На (рис.3.1) показаны формы колебаний, при которых согласно таблицам 2.1 и 2.3 частоты свободных колебаний минимальны.

а)



б)

Рис.3.1. Формы колебаний складчатой оболочки

а – на квадратном плане при $k=l=2$; б – на прямоугольном плане при $k=2, l=4$

Исследовав применяемые виды сейсмической защиты зданий, было принято решение применить упругопластические вставки (УПВ) и установить их в стыках

плоских элементов оболочки (рис.3.2). УПВ проявляют упругопластические свойства и сохраняют необходимую податливость стыков оболочки при динамических воздействиях, сохраняя при этом цельность складчатой оболочки. Для возможности применения УПВ в складчатой оболочке необходимо найти рациональное место их расположения. Для пологой складчатой оболочки УПВ рационально размещать по линиям стыков плоских элементов, чтобы эти вставки, а не элементы оболочки воспринимали сдвигающие усилия, возникающие при колебаниях.

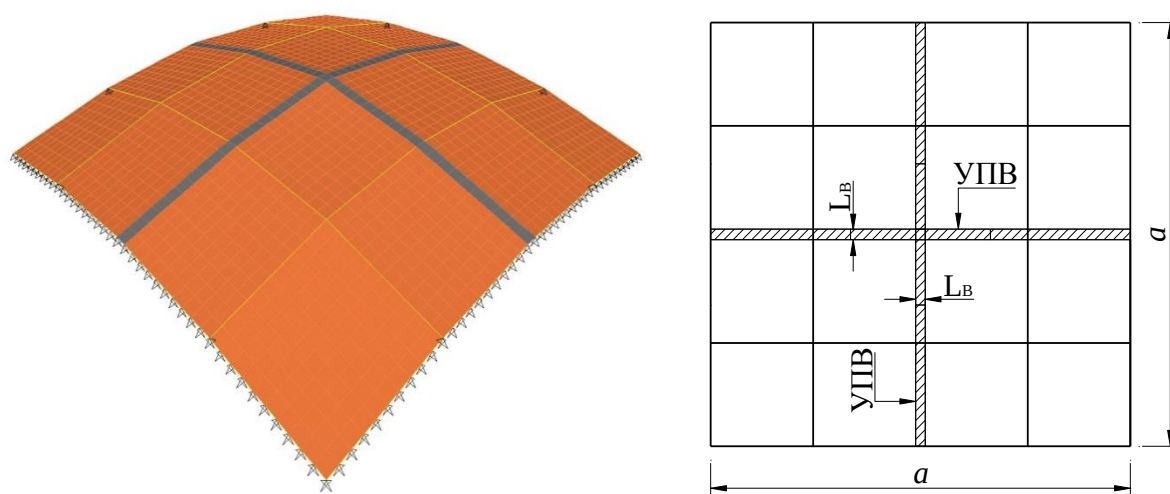


Рис. 3.2. План складчатой оболочки с УПВ

При большой величине L_B необходимо введение поперечной арматуры или перфорированных металлических пластин, герметизируемых резиновыми прокладками. Деталь связи между плоскими плитами в виде УПВ представлена на рис.3.3.

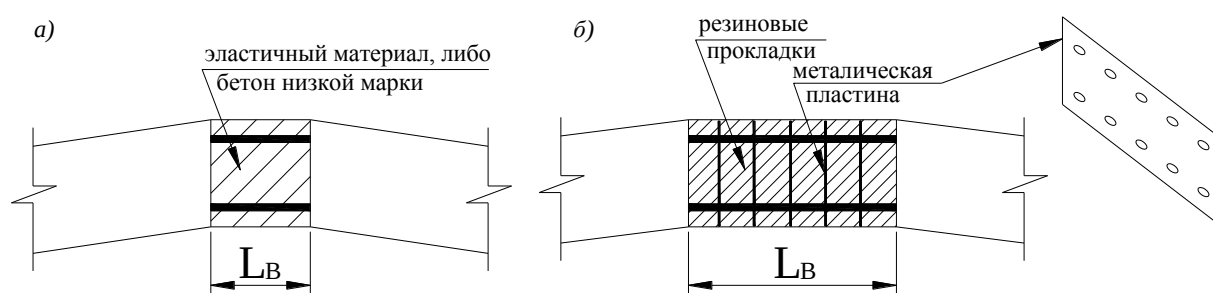


Рис. 3.3. Деталь связи между плоскими плитами в виде УПВ

а) без поперечной арматуры; б) с поперечными металлическими пластинами

В случае сильных воздействий арматура сдвиговых вставок переходит в пластическое состояние. Для оценки прочности нужно учесть данный факт. Размер вставки определяется расчетом из величины ожидаемой экстремальной нагрузки.

Для нахождения места расположения УПВ необходимо определить кососимметричные и симметричные формы колебания, при которой частота является минимальной. Для решения указанного вопроса необходимо исследовать частоту свободных колебаний при различных количествах изломов и волновых числах.

3.2. Определение места положения сдвиговой УПВ в полой складчатой оболочке на квадратном плане

В качестве объектов исследования принимаем квадратные в плане железобетонные оболочки с размерами в плане 12х12 м. Количество изломов (k, l) и волновых чисел (m, n) показано на таблице 3.1.

Для всех оболочек принимаем одинаковыми: толщину оболочки $h = 8$ см; удельный вес материала (железобетон) $\gamma = 2400$ кг/м³; модуль упругости $E = 2,7 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$.

В результате расчета по алгоритму (рис.2.1) были определены минимальные значения частот свободных колебаний складчатой оболочки 12х12м при различных количествах изломов и волновых чисел. Результаты расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Минимальная частота складчатой оболочки на квадратном плане при различных количествах изломов и волновых чисел

Для складчатых оболочек на квадратном плане			
волновые числа	количество изломов	минимальная частота $\omega_{\min}$ (Гц)	волновые числа, при которых $\omega_{\min}$
$m = n = 1 \dots 12$	$k = l = 1$	5.86	$m = 2; n = 2$
	$k = l = 2$	13.18	$m = 3; n = 3$
	$k = l = 3$	23.44	$m = 4; n = 4$

	$k = l = 4$	36.78	$m = 1; n = 1$
$m = 1$ $n = 1 \dots 12$	$k = l = 1$	24.86	$m = 1; n = 2$
	$k = l = 2$	31.53	$m = 1; n = 3$
	$k = l = 3$	29.43	$m = 1; n = 1$
	$k = l = 4$	36.78	$m = 1; n = 1$
$m = 2$ $n = 1 \dots 12$	$k = l = 1$	5.86	$m = 2; n = 2$
	$k = l = 2$	25.44	$m = 2; n = 3$
	$k = l = 3$	27.71	$m = 2; n = 4$
	$k = l = 4$	36.93	$m = 2; n = 1$
$m = 3$ $n = 1 \dots 12$	$k = l = 1$	13.42	$m = 3; n = 2$
	$k = l = 2$	13.18	$m = 3; n = 3$
	$k = l = 3$	26.25	$m = 3; n = 4$
	$k = l = 4$	37.47	$m = 3; n = 1$

Зависимости частот свободных колебаний складчатой оболочки на квадратном плане от волновых чисел при различных количествах изломов и формы колебаний оболочки, соответствующие минимальной частоте колебаний, показаны на рисунке 3.4.

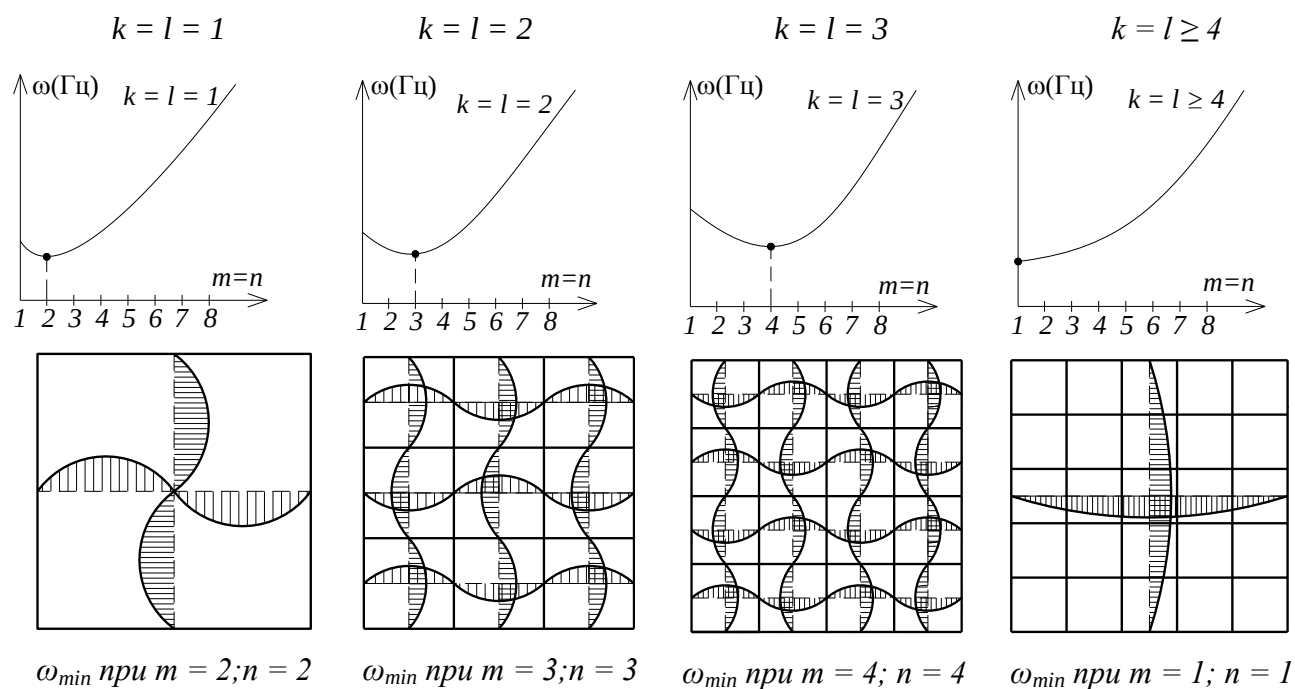


Рис. 3.4. Зависимости частот свободных колебаний складчатой оболочки на квадратном плане от волновых чисел при различных количествах изломов

Анализ графиков (рис.3.4) показывает, что устанавливать сдвиговые УПВ следует в центральных сечениях по линиям изломов (рис.3.4, а, в), поскольку вариант возникновения минимальных частот для оболочек с одним изломом ($k = l = 1$) возникает при волновых числах $m=n=2$; для оболочек с тремя изломами ($k=l=3$) минимальная частота возникает при $m=n=4$, т.е. при кососимметричных формах колебаний.

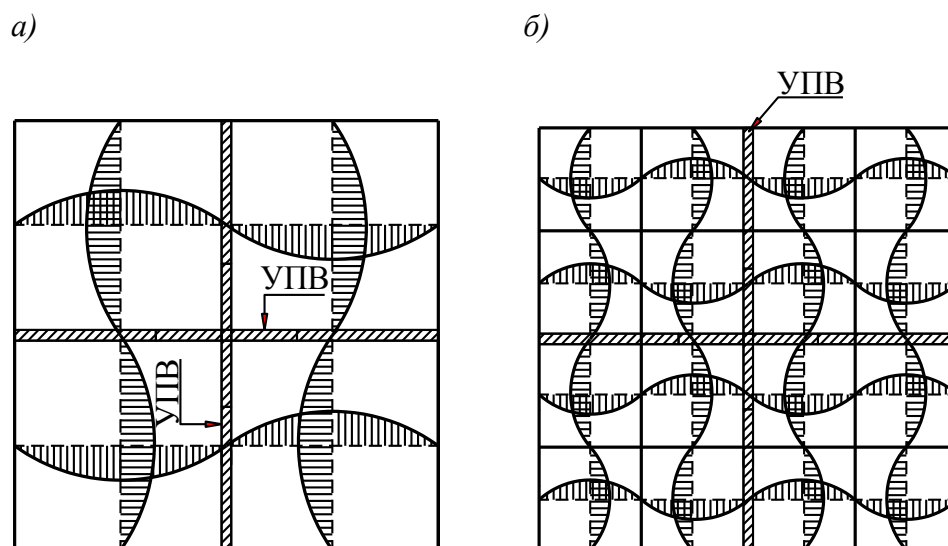


Рис.3.5. Расположение УПВ в складчатых оболочках на квадратном плане при
а) $k = l = 1$ б) $k = l = 3$

Для оболочек с двумя изломами ($k = l = 2$) минимальная частота возникает при волновых числах $m = n = 3$, т.е. при симметричной форме колебания. В данном случае, если УПВ расположена в центральном сечении, она не работает на сдвиг, поэтому рекомендуется поставить УПВ по линиям изломов (рис.3.6).

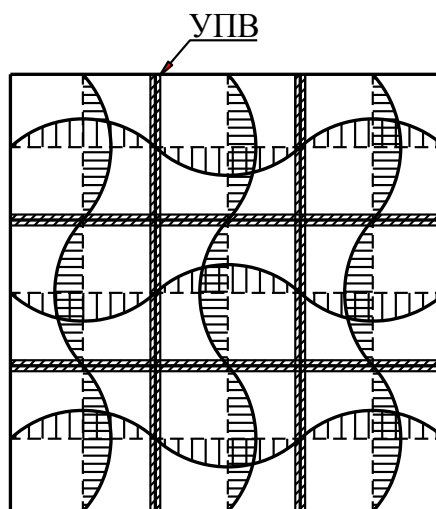


Рис.3.6. Расположение УПВ в складчатых оболочках на квадратном плане при $k = l = 2$

При $k = l \geq 4$ минимальная частота возникает при волновых числах $m = n = 1$, поэтому при четном количестве изломов и нечетных волновых числах включаются в работу УПВ, расположенные на линиях изломов в сечениях, расположенных симметрично центральным осям (рис. 3.6 и рис. 3.7), а при нечетном количестве изломов и четных волновых числах включаются в работу сдвиговые УПВ, расположенные по линиям изломов в центральных сечениях и в сечениях, расположенных симметрично центральным осям (рис.3.5).

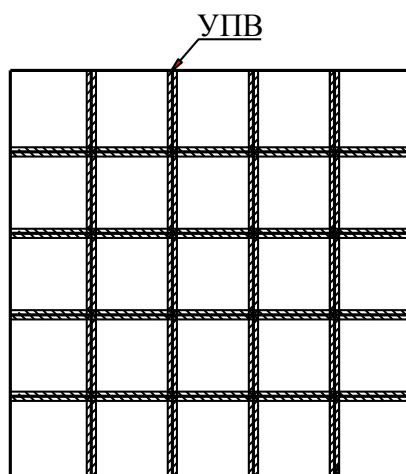


Рис.3.7. Расположение УПВ в складчатых оболочках на квадратном плане при $k = l$

3.3. Определение места положения сдвиговой УПВ в полой складчатой оболочке на прямоугольном плане

В качестве объектов исследования принимаем прямоугольные в плане железобетонные оболочки с размерами в плане 8x12 м. Количество изломов (k, l) и волновое число (m, n) показаны в таблице 3.2.

Для всех оболочек принимаем одинаковыми: толщину оболочки или плиты $h = 8$ см; удельный вес материала (железобетон) $\gamma = 2400$ кг/м³; модуль упругости $E = 2,7 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$.

В результате расчета по алгоритму (рис.2.1) были определены минимальные значения частот свободных колебаний складчатой оболочки 8x12м при различных количествах изломов и волновых числах. Результаты расчета приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Минимальная частота складчатой оболочки на прямоугольном плане при различных количествах изломов и волновых чисел

Для прямоугольного плана складчатых оболочек 8x12м			
волновые числа	количество изломов	минимальная частота $\omega_{\min}$ (Гц)	волновые числа, при которых $\omega_{\min}$
$m = n = 1 \dots 12$	$k = 1; l \geq 1$	9.52	$m = 2; n = 2$
	$k = 2; l = 1$	18.37	$m = 2; n = 2$
	$k = 2; l \geq 2$	21.42	$m = 3; n = 3$
	$k = 3; l = 1$	16.57	$m = 2; n = 2$
	$k = 3; l = 2$	25.36	$m = 3; n = 3$
	$k = 3; l \geq 3$	27.55	$m = 1; n = 1$
$m = 1; n = 1 \dots 12$	$k = 1; l \geq 1$	28.16	$m = 1; n = 1$
$m = 2; n = 1 \dots 12$	$k = 1; l \geq 1$	9.52	$m = 2; n = 2$
$m = 3; n = 1 \dots 12$	$k = 1; l \geq 1$	19.32	$m = 3; n = 2$
$m = 1; n = 1 \dots 12$	$k = 2; l = 1$	29.7	$m = 1; n = 1$
$m = 2; n = 1 \dots 12$	$k = 2; l = 1$	18.37	$m = 2; n = 2$
$m = 3; n = 1 \dots 12$	$k = 2; l = 1$	17.76	$m = 3; n = 2$
$m = 1; n = 1 \dots 12$	$k = 2; l \geq 2$	29.7	$m = 1; n = 1$
$m = 2; n = 1 \dots 12$	$k = 2; l \geq 2$	26.01	$m = 2; n = 1$
$m = 3; n = 1 \dots 12$	$k = 2; l \geq 2$	21.42	$m = 3; n = 3$
$m = 1; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l = 1$	27.55	$m = 1; n = 1$
$m = 2; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l = 1$	16.57	$m = 2; n = 2$
$m = 3; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l = 1$	19.19	$m = 3; n = 2$
$m = 1; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l = 2$	25.33	$m = 1; n = 2$
$m = 2; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l = 2$	28.93	$m = 2; n = 1$
$m = 3; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l = 2$	25.36	$m = 3; n = 3$
$m = 1; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l \geq 3$	24.76	$m = 1; n = 2$
$m = 2; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l \geq 3$	28.47	$m = 2; n = 1$
$m = 3; n = 1 \dots 12$	$k = 3; l \geq 3$	27.32	$m = 3; n = 1$

Зависимости частот свободных колебаний складчатой оболочки на прямоугольном плане ($b/a < 2$) при различных количествах изломов от волновых

чисел показаны на рисунке 3.8. Здесь же показаны формы колебаний оболочки, соответствующие минимальной частоте колебаний.

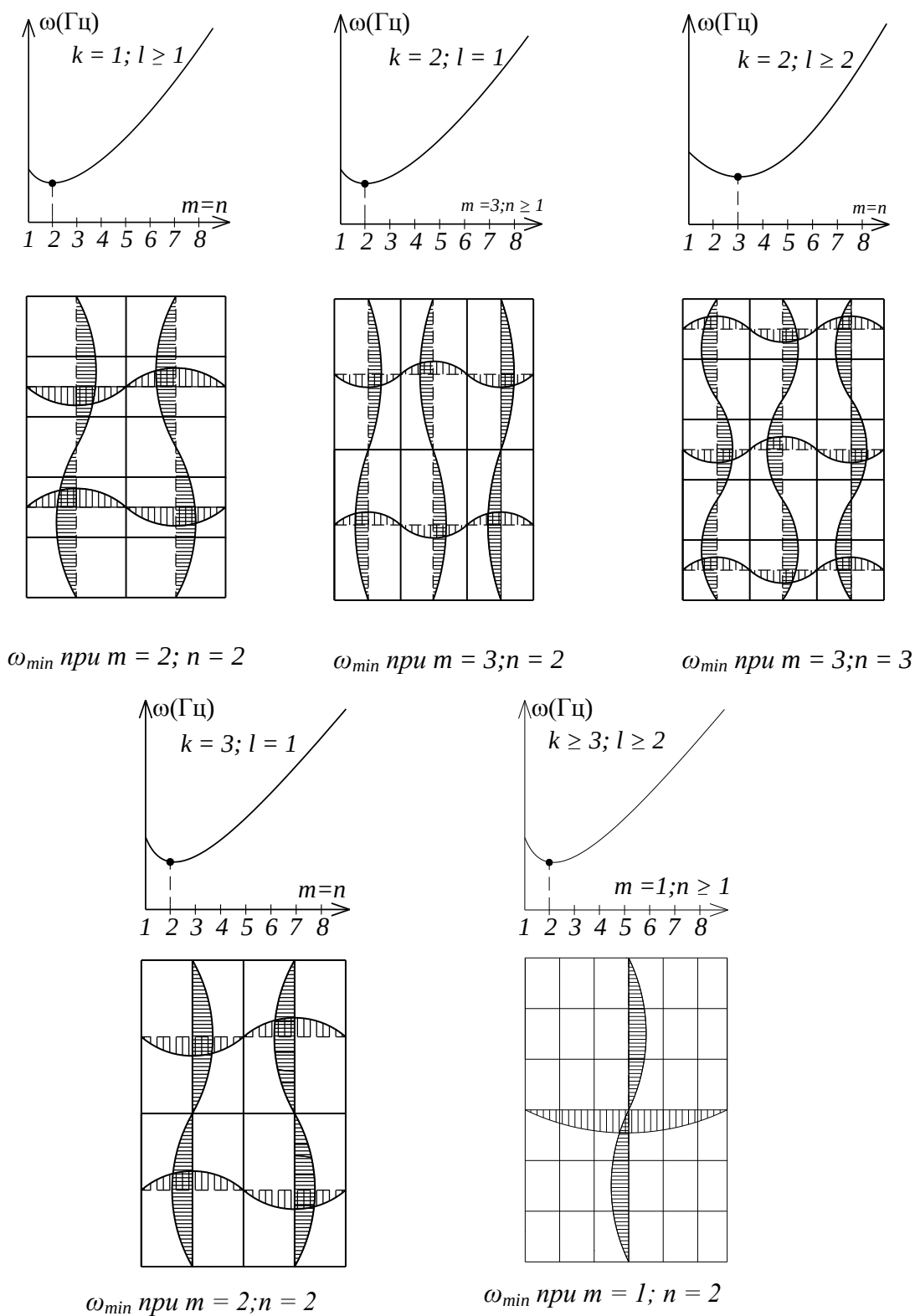


Рис. 3.8. Зависимости частот и форм свободных колебаний складчатой оболочки на прямоугольном плане при различных количествах изломов от волновых чисел

Результаты показали, что для складчатых оболочек на прямоугольном плане при количестве изломов $k = 1; l \geq 1$ и $k = 3; l = 1$ минимальная частота возникает при волновых числах $m = 2; n = 2$, т.е. при кососимметричной форме колебаний. В данном случае УПВ предполагается расположить в центральном сечении плана оболочки по 2 направлениям x и y (рис.3.9).

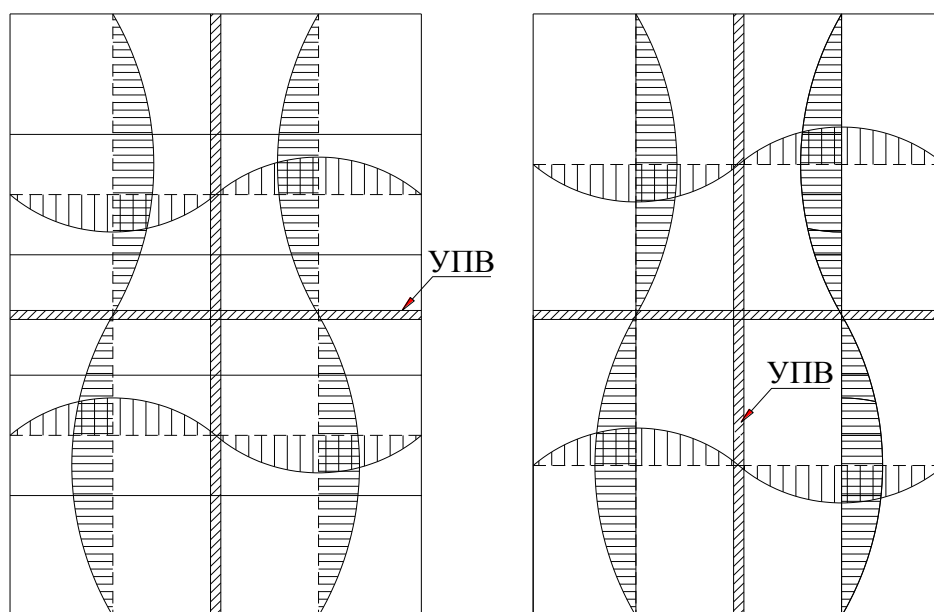


Рис.3.9. Расположение УПВ в складчатых оболочках на прямоугольном плане

При количестве изломов $k = 2; l = 1$ и $k \geq 3; l \geq 2$ минимальная частота возникает при волновых числах $m = 3; n = 2$ и $m = 1; n = 2$, т.е. при кососимметричной форме колебаний по одному направлению x или y . В данном случае УПВ располагается в центральном сечении плана оболочки по направлению x или y (рис.3.10, а и б).

При $k = 2; l \geq 2$ минимальная частота возникает при волновых числах $m = n = 3$, т.е. при симметричной форме колебаний. Если УПВ расположена в центральном сечении, то она не работает на сдвиг, поэтому предлагается поставить УПВ по линиям изломов (рис.3.10, в).

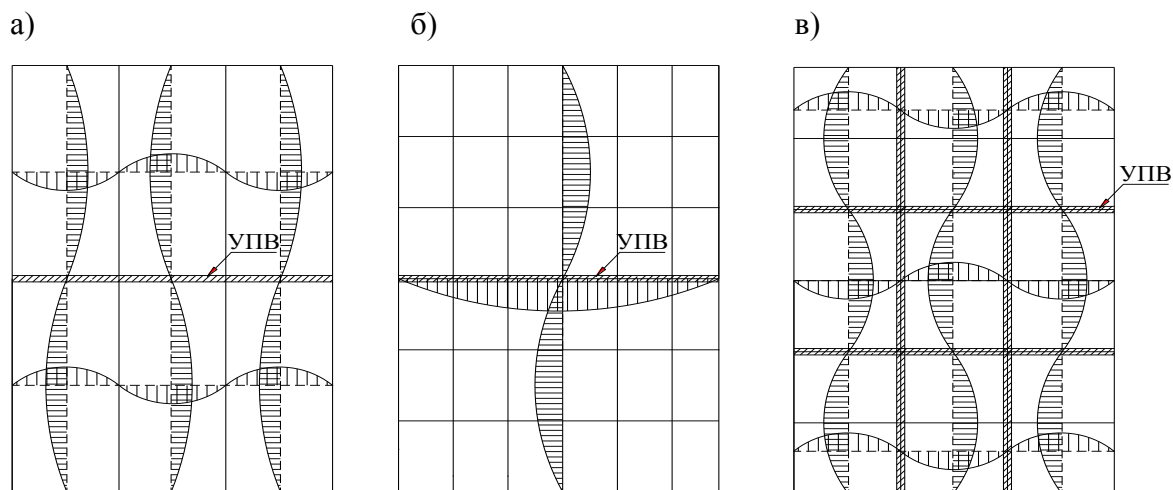


Рис. 3.10. Расположение УПВ в складчатых оболочках на прямоугольном плане

а) $k = 2; l = 1$ б) $k \geq 3; l \geq 2$ в) $k = 2; l \geq 2$

ГЛАВА IV

РАСЧЕТ ПОЛОГИХ СКЛАДЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК С УПВ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

4.1. Основные понятия расчета по акселерограммам (динамический анализ)

В случае сейсмического воздействия нужно решить систему дифференциальных уравнений с начальными условиями:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -ME_x\ddot{X}_0(t), \quad (4.1)$$

здесь $\ddot{u}$, $\dot{u}$, u - вектор ускорения, скорость и перемещение сосредоточенной массы; M – матрица масс; C – матрица диссипации; K – матрица жесткости; $\ddot{X}_0(t)$ - ускорение грунта.

Уравнение (4.1) имеет три компоненты сейсмических ускорений $\ddot{X}_0(t)$; $\ddot{Y}_0(t)$ и $\ddot{Z}_0(t)$:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M(E_x\ddot{X}_0(t) + E_y\ddot{Y}_0(t) + E_z\ddot{Z}_0(t)), \quad (4.2)$$

здесь компоненты $E_x(t)$; $E_y(t)$ и $E_z(t)$ определены аналогично (4.1).

Решены рассмотренные системы дифференциальных уравнений по различным численным методам в [9], [46], [51]. Разложения колебаний по собственным формам считаются эффективным в случае линейной системы.

Основные этапы расчёта [74] :

1. Сформировать исходные матрицы: диссипации C , жесткости K и масс M .
2. Определить собственные частоты колебаний системы.

При определении собственной частоты колебаний пренебрегают членами в уравнении, учитывающими затухание. Частота определена из обобщенной проблемы собственных значений:

$$(K - \omega^2 M) \cdot \theta = 0;$$

$$\det(K - \omega^2 M) = 0.$$

Собственный вектор нормирует с матрицей масс:

$$\Phi_k^T M \Phi_k = 1.$$

3. Разложить системы на нормальные составляющие.

При анализе вынужденных колебаний вектор амплитуд перемещений определен преобразованием координат:

$$u = \Phi q; \quad \dot{u} = \Phi \dot{q}; \quad (4.3)$$

здесь: Φ - матрица преобразования.

$$\Phi^T = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n). \quad (4.4)$$

Подставив (4.3) в (4.2) и умножив левую часть уравнения на Φ^T , получим:

$$\Phi^T M \Phi \ddot{q} + \Phi^T C \Phi \dot{q} + \Phi^T K \Phi q = -\Phi^T M E_x \ddot{X}_0(t). \quad (4.5)$$

Применим условие ортогональности:

$$\Phi^T M \Phi = I; \quad (4.6)$$

$$\Phi^T K \Phi = \omega. \quad (4.7)$$

И если условие выполнено:

$$\phi_{i^*}^T C \phi_{j^*} = 0 \quad (i^* \neq j^*); \quad (4.8)$$

$$\phi_{i^*}^T C \phi_{j^*} = 2\beta_i \omega_i \quad (i^* = j^*),$$

то система уравнения (4.1) будут распадаться на n^* независимых уравнений, каждое из которых определено обобщенной координатой q_{i^*} , отвечающей i -той форме колебания,

$$\ddot{q}_{i^*} + 2\beta_{i^*} \omega_i \dot{q}_{i^*} + \omega_{i^*}^2 q_{i^*} = -\Gamma_{i^*} \ddot{X}_0(t); \quad (4.9)$$

здесь: β_{i^*} - значение относительного затухания для i -того тона колебаний,

$-\Gamma_{i^*} = \phi^T M E_x$ - значение модального коэффициента участия.

Тогда решение уравнений движений систем с n^* степенями свободы приводит к решению задачи для линейного осциллятора.

4. Интегрировать полученные системы уравнений.

Решение уравнения (4.9) получено при использовании алгоритма интегрирования с помощью интеграла Дюамеля:

$$q_{i*}(t) = \frac{\Gamma_{i*}}{\omega_{i*}} \int_0^t \ddot{X}_0(\tau) e^{-\beta_{i*} \omega_{i*} (t-\tau)} \cdot \sin \omega_{i*}^D (t-\tau) d\tau; \quad (4.10)$$

здесь $\omega_{i*}^D = \omega_{i*} \sqrt{1 - \beta_{i*}^2}$ – значение частоты с учетом затухания.

Для получения полных реакций систем необходимо найти решение всех n^* уравнений. Перемещения узловой точки получены суперпозицией реакций систем по всей форме.

5. Найти истинные перемещения.

При помощи обратных преобразований необходимо перейти к перемещению и в исходных базисах. Амплитуда для j -того тона:

$$u_{i*}(t) = \phi_{i*} \cdot q_{i*}(t). \quad (4.11)$$

6. Определить усилия в элементах.

На основе принципа независимости действия сил усилия определены по сумме усилий от сил инерции и воздействия внешних сил. В произвольном сечении усилие имеет вид:

$$S_k(t) = S_{kF} \cdot F(t) + S_{k1} \cdot J_1(t); \quad (4.12)$$

здесь: S_{kF} – значение усилия в сечении k от $F = 1$;

S_{kl} – значение усилия в сечении k от $J_j^* = 1$.

Уравнение (4.12) можно записать в перемещениях

$$S_k(t) = S_{kF} \cdot F(t) + b_{k1} \cdot u(t); \quad (4.13)$$

здесь: b_{k1} – матрица усилия в сечении k от единичного перемещения.

С учетом сил диссипации уравнение (4.13) примет вид:

$$S_k(t) = S_{kF} \cdot F(t) + \left[b_{k1} + \frac{S_{k1} \cdot \beta_1 \cdot \dot{u}(t)}{u(t)} \right] \cdot u(t); \quad (4.14)$$

здесь затухание рассмотрено как увеличение жесткости.

Нахождение усилия будет усложняться тем, что оно является переменным, зависящим от времени. Для оценки сейсмостойкости пологой оболочки должны определить максимальное значение усилия $S_k \max$.

Применение разложения систем дифференциальных уравнений по собственным формам имеет преимущества:

- Интегрирование дифференциальных уравнений, которые описывают движения по j -той форме проще, чем исходных систем уравнений.
- необходимая точность решения достигнута при расчете в сумме не всех n^* собственной формы, а только их части $S < n^*$.

Применение описанного метода возможно лишь для линейной системы, а также систем, матрицы диссипации C которых будут удовлетворять условию (4.8).

Затухание колебаний должно быть пропорционально массе и жесткости. В данном случае матрица C в уравнении (4.8) имеет вид:

$$C = \bar{a} \cdot M + \bar{b} K, \quad (4.15)$$

здесь: $\bar{a}$ и $\bar{b}$ – коэффициенты пропорциональности, вычисленные по значениям коэффициентов демпфирования β_i , которые относятся к колебаниям с разными частотами.

Запись (4.5) позволяет свести решение к разложению по собственным формам колебаний, поэтому каждый член суммы (4.5) будет приводиться к диагональной матрице.

В некоторых задачах предположение о пропорциональных демпфированиях является адекватным. Однако при расчете сооружений с широким диапазоном свойств материалов может оказываться требуемым применение модели непропорциональных демпфирований. При расчете взаимодействия сооружений с основанием значительная часть демпфирования приходилась на основание. В данном случае для различных частей сооружений целесообразно применение матрицы демпфирования с различными

коэффициентами $\bar{a}$ и $\bar{b}$, в итоге матрица демпфирования не удовлетворяет выражению (4.8).

Решение выражений для сооружений с непропорциональным демпфированием получается при использовании алгоритма прямого интегрирования [74].

4.2. Получение силовых диаграмм сдвиговых УПВ и характеристики с гистерезисной петлей

Методы расчета высотных зданий с УПВ разработаны Ю.Л. Рутманом [73], В.И. Плетнёвым [69], А.А. Смирновым [81], К.Т. Нгуеном [69], О.В. Голых [20]. Показано, что вставки воспринимают сдвиговые усилия, возникающие при неравномерной осадке опор смежных зданий. Также и при динамических воздействиях такие вставки могут играть роль демпфера и помогут гасить колебания.

Для расчета рассматривается идеализированная схема сдвига арматуры в УПВ по теории Ю.Л. Рутмана [73] (рис.4.1).

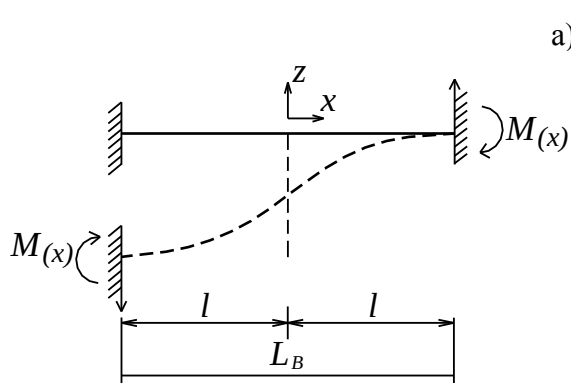


Рис.4.1. Сдвиговая арматура в УПВ

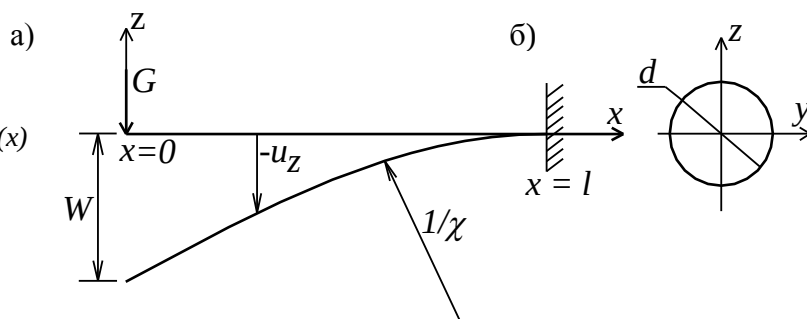


Рис. 4.2. а) Эквивалентность сдвиговой консоли,
б) сечение арматуры

Здесь x – координата вдоль оси стержня ($0 \leq x \leq l$); z – координата, перпендикулярная оси стержня ($-d/2 \leq z \leq d/2$); G – сосредоточенная сила, уравновешивающая опорный момент $M(x)$; l – длина стержня до точки приложения силы G ; L_B – ширина вставки; d – диаметр рабочей арматуры; $\chi(x)$ – кривизна деформированного стержня; u_z – прогиб в сечении с координатой x ; $W = -u_z(0)$ – прогиб в центральном сечении.

Вводятся безразмерные параметры:

$$p = \frac{2.G.l}{\sigma_T.d^3}; v = \frac{W.d}{\varepsilon_T.l^2}; \frac{\chi.d}{2.\varepsilon_T} = \tau; \tau|_{x=l} = t.$$

Параметрические интегралы имеют вид:

$$p(t) = \frac{(3t^2 - 1) + \lambda(2t + 1)(t - 1)^2}{6t^2}, \quad (4.16)$$

$$v(t) = \frac{2t(4\lambda^2 t^6 + 9\lambda(1 - \lambda)t^5 + (20 - 21\lambda + 6\lambda \ln t)(1 - \lambda)t^3 - (1 - \lambda)^2(18t^2 - 2))}{3(4\lambda^2 t^6 + 12\lambda(1 - \lambda)t^5 + (1 - \lambda)^2(9t^4 - 6t^2 + 1) - 4\lambda(1 - \lambda)t^3)}. \quad (4.17)$$

Для исследований работы УПВ механические характеристики арматурной стали согласно [20] принимаем по таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Механические характеристики арматурной стали

Класс арматурной стали	Предел текучести		Временное сопротивление разрыву		Относительное удлинение%	Равномерное удлинение, %	Ударная вязкость при температуре -60		Испытание на изгиб в холодном состоянии (с-толщина оправки, d- диаметр стержня)
	Н/мм	кгс/мм	Н/мм	кгс/мм			МДж/м	кгс.м/см	
	не менее								
A-I (A240)	235	24	373	38	25	-	-	-	180°; c = d
A-II (A300)	295	30	490	50	19	-	-	-	180°; c = 3d
Ac-II(A300)	295	30	441	45	25	-	0.5	5	180°; c = d
A-III(A400)	390	40	590	60	14	-	-	-	90°; c = 3d
A-IV(A600)	590	60	883	90	6	2	-	-	45°; c = 5d
A-V(A800)	785	80	1030	105	7	2	-	-	45°; c = 5d
A-VI(A1000)	980	100	1230	125	6	2	-	-	45°; c = 5d

На основе методики Ю. Л. Рутмана [73], построим алгоритм определения характеристик УПВ для складчатых оболочек (рис.4.3).

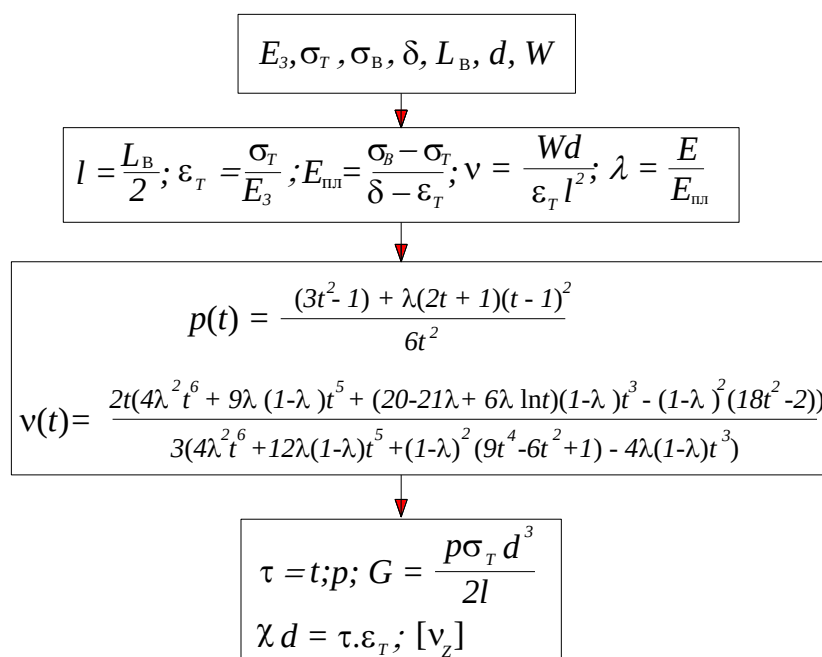


Рис.4.3. Алгоритм определения характеристик УПВ

Здесь E_3 - модуль упругости арматуры; σ_T - предел текучести; σ_B - временное сопротивление разрыву; δ - относительное удлинение; d - диаметр арматуры; ε_T - деформация текучести; $p(t)$, $v(t)$ - параметрические интегралы.

Рассмотрим арматуру А-III (А400), $E = 2.10^5$ МПа, $\sigma_T = 390$ МПа, $\sigma_B = 590$ МПа, $\delta \cong 14\%$ (таблица 4.1).

В случае упругопластической диаграммы с линейным упрочением

$$\lambda = \frac{E_{пл}}{E} = \frac{1148}{2.10^5} = 0.00724,$$

$$\text{где } E_{пл} = \frac{\sigma_B - \sigma_T}{\delta - \varepsilon_T} = \frac{590 - 390}{0.14 - 0.00195} = 1148 \text{ МПа}; \quad \varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E} = \frac{390}{2.10^5} = 0.00195; \quad v = \frac{Wd}{\varepsilon_T l^2}.$$

Из (4.16) и (4.17) получим:

$$\tau = t; p; G = \frac{p\sigma_T d^3}{2l}; \chi \frac{d}{2} = \tau \varepsilon_T.$$

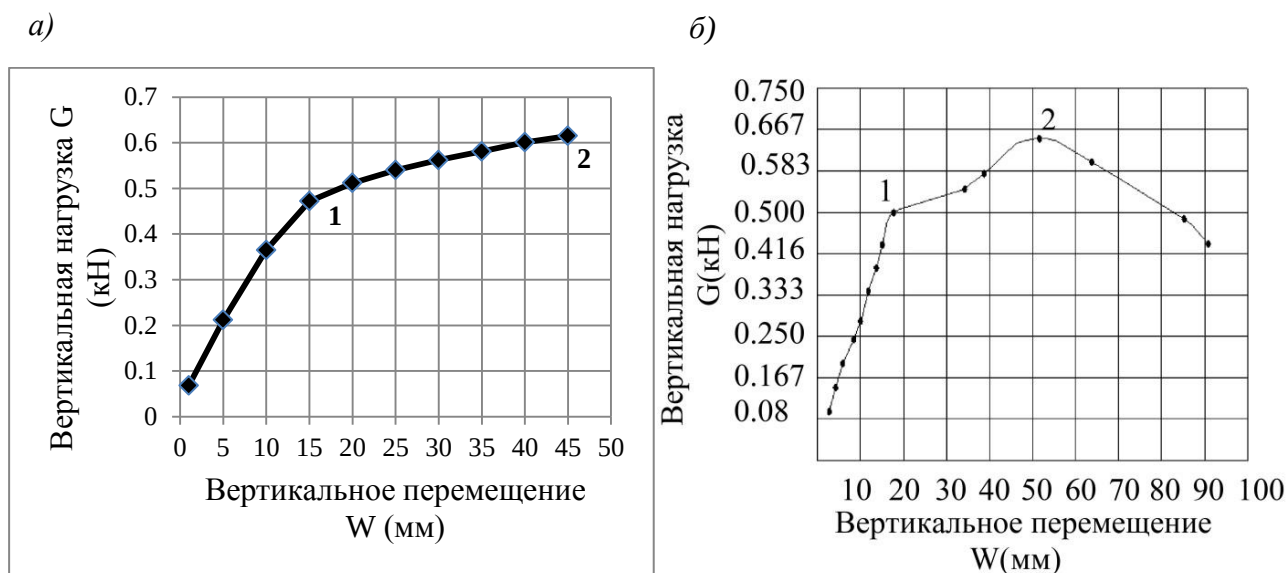
Результаты расчета сдвиговой нагрузки арматурного стержня класс А-III (А400) $d = 10$ мм, $L_B = 0,2$ м сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

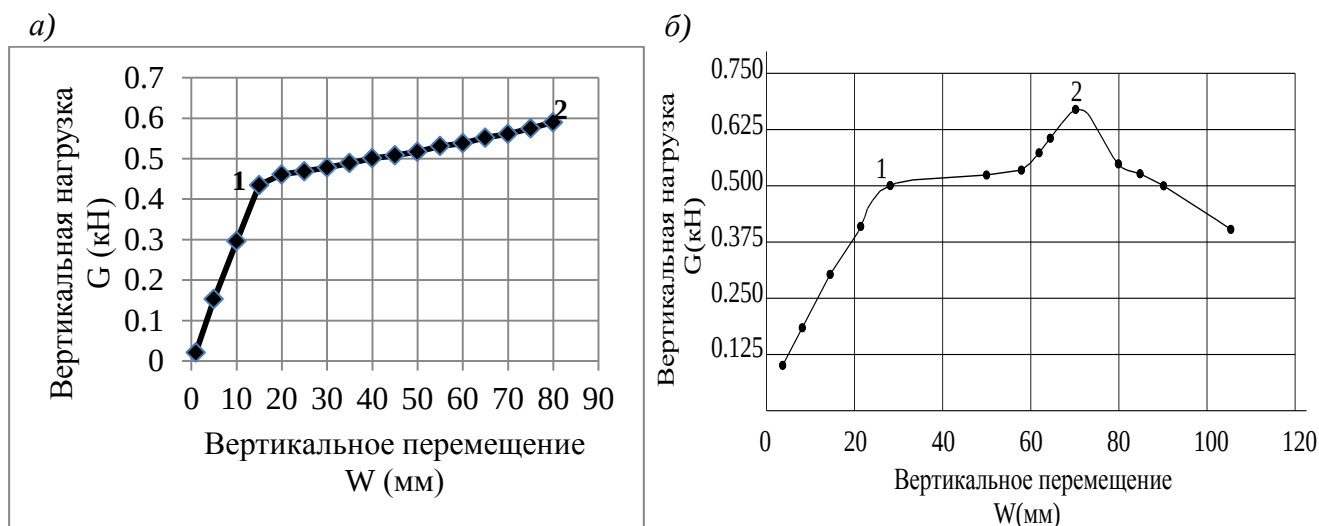
Величины сдвиговой нагрузки G в зависимости от вертикальных перемещений W для одного стержня $d = 10\text{мм}$, $L_B = 0,2\text{м}$.

$W, \text{м}$	ν	t	p	$\chi \frac{d}{2}, \%$	G для 1-го стержня (кН)	G для 1-пог.м вставки (кН)
0.001	0.128	0.064	0.021	0.04	0.021	0.84
0.005	0.641	0.321	0.157	0.20	0.153	6.12
0.01	1.282	0.641	0.304	0.40	0.296	11.84
0.015	1.923	0.962	0.451	0.60	0.435	17.4
0.020	2.564	1.717	0.395	1.07	0.461	18.44
0.025	3.205	2.812	0.455	1.75	0.469	18.76
0.030	3.846	4.880	0.490	3.04	0.478	19.12
0.035	4.487	7.815	0.501	4.88	0.489	19.56
0.040	5.128	10.555	0.500	6.59	0.501	20.04
0.045	5.769	12.640	0.512	7.89	0.508	20.32
0.050	6.410	14.573	0.51	9.09	0.517	20.68
0.055	7.051	16.334	0.516	10.19	0.531	21.24
0.060	7.692	17.896	0.536	11.17	0.538	21.52
0.065	8.333	19.407	0.528	12.11	0.552	22.08
0.070	8.974	20.847	0.543	13.01	0.561	22.44
0.075	9.615	22.124	0.531	13.81	0.575	23.00
0.080	10.256	23.446	0.601	14.63	0.590	23.60

По алгоритму (рис.4.3) определены нагрузки стержня УПВ класса А-III (А400) $L_B = 10 \text{ см}$ и $d = 8\text{мм}$ (рис.4.4,а), $L_B = 20 \text{ см}$ и $d = 10\text{мм}$ (рис.4.5,а) при различных вертикальных перемещениях конца стержня. На рис.4.4,б и рис.4.5,б показаны графики зависимости сдвиговых нагрузок от прогибов по результатам экспериментов В.И. Плетнёва [69].

Рис. 4.4. Силовая диаграмма для 1-го стержня $\phi 8$ А-III

а - по аналитическому методу, б - по результатам экспериментов Плетнёва, В.И [69]

Рис. 4.5. Силовая диаграмма для 1-го стержня $\phi 10$ А-III

а - по аналитическому методу, б - по результату эксперимента Плетнёва, В.И [69]

Точка 1 на рис.4.4 и рис.4.5 соответствует значению нагрузки, после достижения которой, происходил интенсивный рост перемещений даже при незначительном увеличении нагрузки. Нагрузку, соответствующую точке 1, согласно работам Плетнева В.И., будем называть теоретически критической $G_{кр}$. Нагрузку, соответствующую точке 2, будем называть теоретически предельной $G_{пр}$.

В табл.4.3 показано сравнение значений критической и предельной нагрузки по результату эксперимента Плетнёва [69] и по аналитическому методу.

Таблице. 4.3

Сравнение значений критической и предельной нагрузки по результатам эксперимента и по аналитическому методу

Вариант УПВ	Критическая нагрузка для 1 стержня, кН		Откло- нение, %	Предельная нагрузка для 1 стержня, кН		Откло- нение, %
	эксперимента льно	аналитическ и		эксперимента льно	аналитиче ски	
$\phi 8, L_B=0,1$ м	0,500	0,472	5,9	0,650	0,615	5,70
$\phi 10, L_B=0,2$ м	0,465	0,435	6,9	0,650	0,590	10,2

При циклических колебаниях накапливаются пластические деформации, поэтому расчет необходимо производить в нелинейной постановке. Для учета пластических деформаций предлагается описать зависимости «напряжения—относительные деформации» петель гистерезиса согласно теории В.А. Ивовича [45] (рис.4.6). Чем больше площадь петли, тем больше рассеивание энергии в конструкции и тем быстрее затухают колебания. При таком походе учитывается большее поглощение энергии динамического воздействия по сравнению с упругой постановкой задачи. Расчет выполнен в программе «SAP2000», с помощью опции «Нелинейный свойство материала».

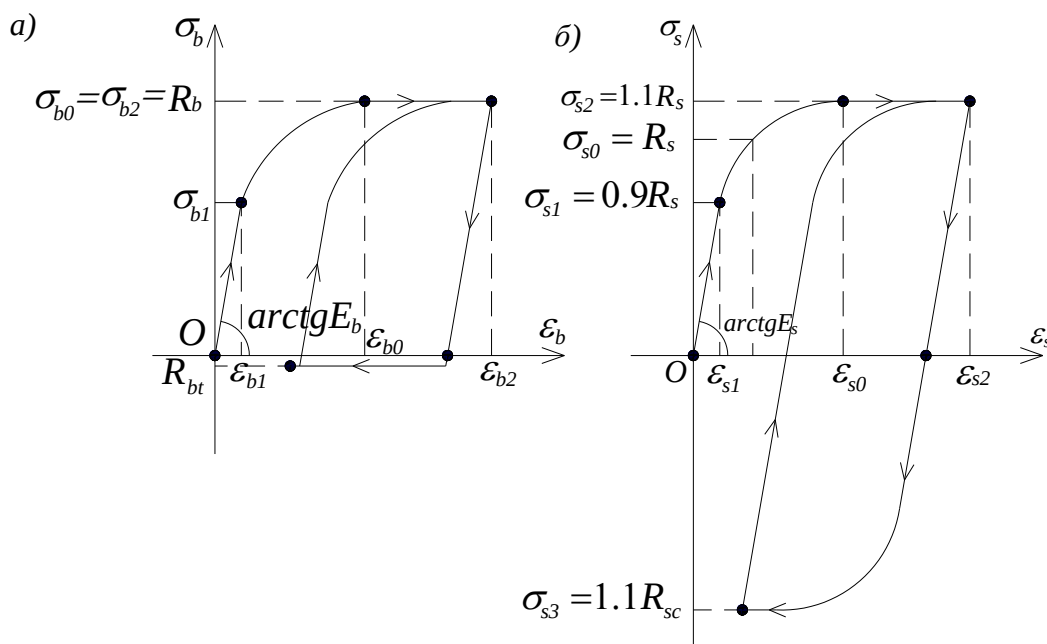


Рис.4.6. Характеристика бетона и арматуры с гистерезисной петлей:

а – для бетона; б – для арматуры

Согласно графику (рис.4.6 , а) вычисляем сжимающие напряжения бетона σ_b :

$$\text{при } 0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1} \quad \sigma_b = \varepsilon_b \cdot E_b; \quad (4.18)$$

$$\text{при } \varepsilon_{b1} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b0} \quad \sigma_b = \left[\left(1 - \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \right) \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} + \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right] R_b; \quad (4.19)$$

$$\text{при } \varepsilon_{b0} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2} \quad \sigma_b = R_b; \quad (4.20)$$

$$\text{значения напряжений } \sigma_{b1} \text{ принимаем: } \sigma_{b1} = 0.6R_b; \quad (4.21)$$

$$\text{значения относительных деформаций } \varepsilon_{b1} \text{ принимаем: } \varepsilon_{b1} = \frac{\sigma_{b1}}{E_b}, \quad (4.22)$$

где E_b – значение начального модуля упругости бетона,

R_b , R_{bt} – значение расчетного сопротивления бетона осевому сжатию и растяжению соответственно.

Согласно диаграмме (рис.4.6, б) значения напряжения в арматуре σ_s определены в зависимости от относительной деформации ε_s по следующим формулам:

$$\text{при } 0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s1}: \quad \sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s; \quad (4.23)$$

$$\text{при } \varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}: \quad \sigma_s = \left[\left(1 - \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right) \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{s1}} + \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right] R_s \leq 1.1 R_s. \quad (4.24)$$

Расчетные значения сопротивления арматуры растяжению R_s определяем по п.п.6.2.8 [86]. Модуль упругости арматуры: $E_s = 2,0 \cdot 10^5$ МПа;

Деформации арматуры ε_{s0} определены по следующим формулам:

деформация арматуры в физическом пределе текучести: $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s}$;

деформация арматуры в условном пределе текучести: $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s} + 0.002$.

4.3. Численный метод расчета пологих складчатых оболочек с использованием УПВ на сейсмические воздействия

До появления компьютеров существовало множество методов расчета оболочек. Все они были основаны на выводе уравнений для нахождения компонентов напряженно-деформированного состояния из системы уравнений теории оболочек, включающей дифференциальные уравнения равновесия, уравнения движения. Эти методы называют аналитическими. Они содержали в себе разнообразные упрощения и допущения, направленные на сокращение количества и трудоемкости вычислений. С появлением компьютеров вычисления перестали быть проблемой, встал вопрос о возможности алгоритмизации необходимых математических операций. Аналитические методы расчета требовали индивидуального подхода к конкретному классу поверхностей, возникла потребность в универсальном методе расчета. Таким методом стал метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий рассчитать любые конструкции с любой геометрией и достаточно простой в алгоритмизации, что вызвало появление множества компьютерных расчетных программ на его основе. В данный момент МКЭ повсеместно применяется и продолжает бурно развиваться.

Численные методы, к которым относится МКЭ, заменяют поиск математической записи искомой функции в нескольких заранее назначенных характерных точках конструкции. Таким образом, в основе МКЭ лежит принцип дискретизации расчетной схемы с целью упрощения математических вычислений (при этом количество вычислений возрастает). Расчетная схема разбивается на множество элементов простой геометрической формы, соединенных между собой в узловых точках. Для каждого конечного элемента получают аналитическое решение уравнения, описывающего его напряженно-деформированное состояние. На основе этих решений составляется уравнение, описывающее напряженно-деформированное состояние всей конструкции. Метод конечных элементов реализуется в форме метода перемещений. От выбора метода зависят искомые неизвестные, по которым в дальнейшем будут вычислены остальные компоненты напряженно-деформированного состояния конструкции. Последовательность этапов расчета методом конечных элементов, реализованного в форме метода перемещений, приведена ниже по [97].

1. Дискретизация рассматриваемой конструкции, то есть ее разбиение на конечные элементы определенной формы и размеров, соединенных между собой в узловых точках. При этом конечным элементам назначаются жесткости, нагрузки и граничные условия. Происходит нумерация конечных элементов и узлов.
2. Вычисление матриц жесткости отдельных конечных элементов в локальной системе координат.
3. Преобразование матриц жесткости элементов в общую для всей конструкции систему координат.
4. Формирование с использованием матриц жесткости элементов системы уравнений движения или равновесия конструкции $L(u_i, v_i, w_i, F) = 0$, где L – некоторый дифференциальный оператор; u_i, v_i, w_i – перемещения узловых точек; $i = 1, 2, \dots, n^*$; n^* – число узлов; F – параметр нагрузки.
5. Решение полученной системы уравнений относительно узловых перемещений.

6. Вычисление деформаций элементов по известным узловым перемещениям и вычисление напряжений в элементах по известным деформациям.

Развитие метода конечных элементов в настоящее время продолжается и направлено в первую очередь на ускорение времени расчета и уменьшение погрешностей.

В данной работе используем программные комплексы «*SAP2000*» и «*ANSYS*» для моделирования и определения характеристик УПВ, плит складчатой оболочки. Исследования жесткостных характеристик УПВ и влияние наличия УПВ на напряжено-деформированное состояние зданий сложной макроструктуры при неравномерной осадке представлено в работах [20], [69], [70]. Исследования характеристик УПВ для пологой складчатой оболочки предложены в пункте 4.2.

Для пологой складчатой оболочки УПВ рационально размещать по линиям стыков плоских элементов, чтобы при вынужденных колебаниях эти вставки воспринимали энергию.

Сейсмическую нагрузку зададим акселерограммой типа Эль-Центро [79], (рис.4.7).

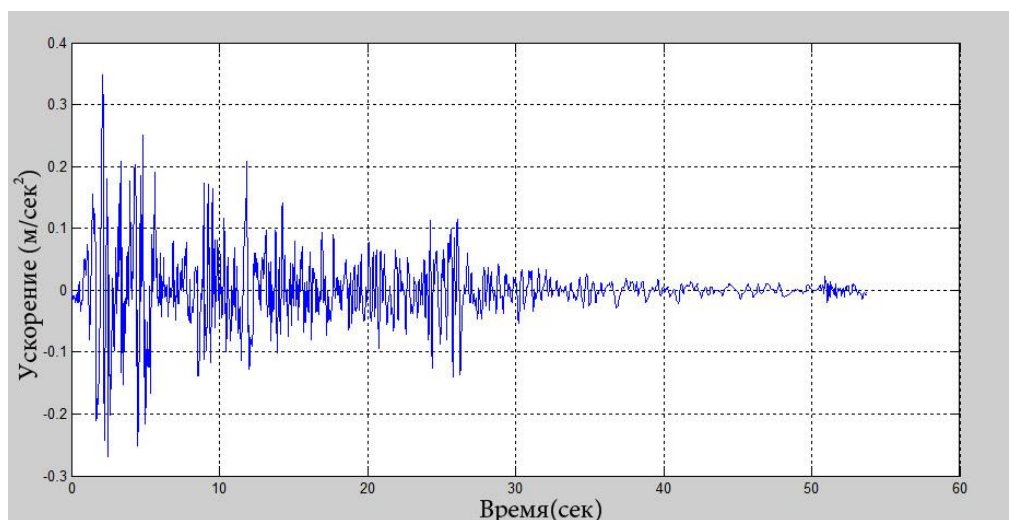


Рис.4.7. Акселерограмма землетрясения Эль-Центро

В качестве объектов исследования рассмотрим железобетонные оболочки, составленные из плоских элементов, с размерами в плане 18х18м при количестве изломов $k = l = 3$. Трехмерная модель складчатой оболочки без УПВ и с УПВ

показана на рис.4.8. Согласно исследованиям, описанным в главе 3, принимаем положение УПВ в центральных сечениях оболочки. Геометрия складчатой оболочки задается в виде трехмерной конечно-элементной модели, состоящей из 1600 элементов и 1640 узлов.

Для всех оболочек принимаем одинаковыми: толщину оболочки или плиты $h = 10$ см из бетона В25; модуль упругости $E_b = 30 \cdot 10^3$ МПа; удельный вес материала (железобетон) $\gamma = 2500$ кг/м³; коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$. Для вставки используем бетон В10, имеющий модуль упругости $E_b = 18 \cdot 10^3$ МПа.

УПВ армируются двумя слоями арматуры, шаг 50мм, т.е. 40 стержней для каждого погонного метра УПВ.

Арматуры АIII приняты для УПВ имеют следующие характеристики: $d = 12$ мм с характеристиками: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_b = 590$ МПа, $\sigma_t = 390$ МПа, $\varepsilon = 14\%$.

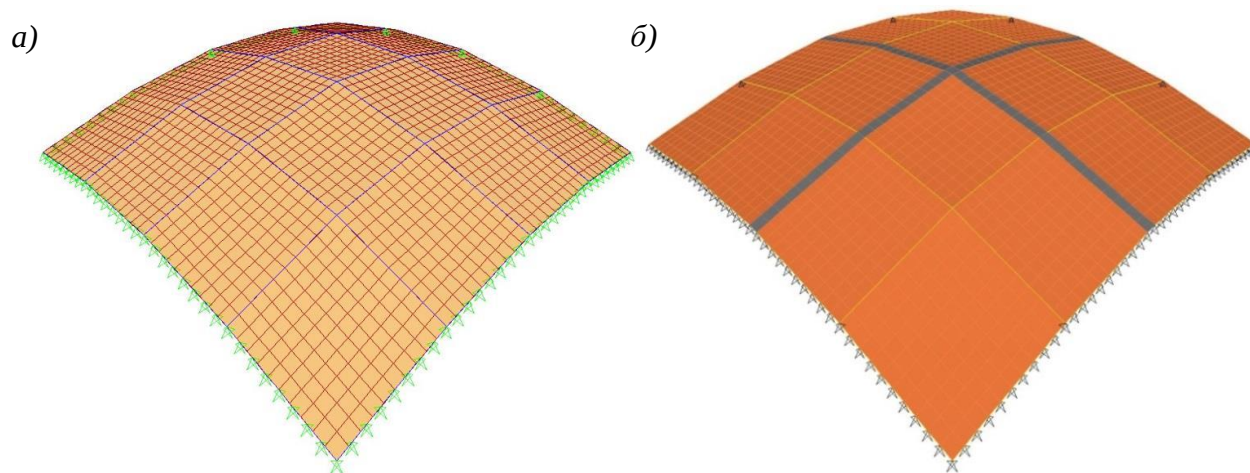
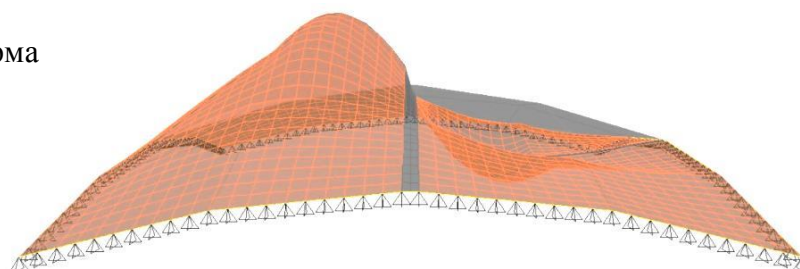


Рис.4.8. Конечно-элементная модель пологих складчатых оболочек 18x18м:

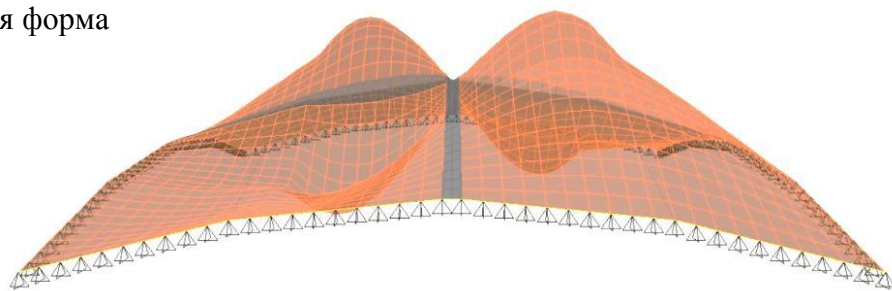
a – без УПВ; *б* – с УПВ шириной 0.4м

На рис.4.9 приведены 5 форм свободных колебаний пологих складчатых оболочек с УПВ.

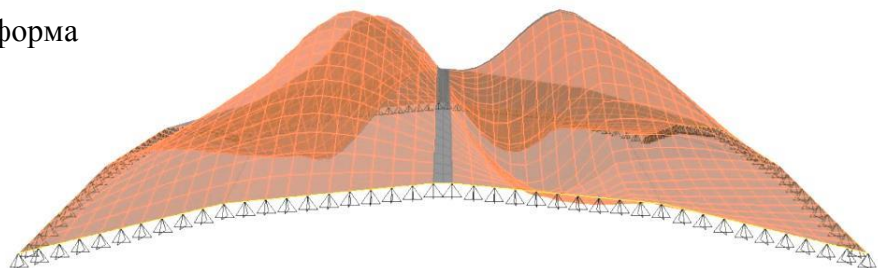
а) 1-ая форма



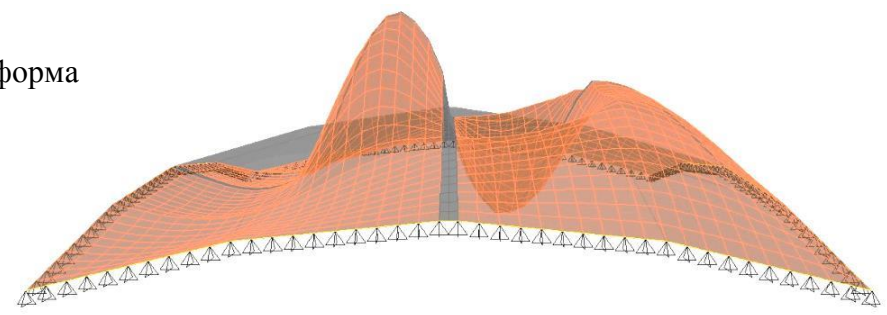
б) 2-ая форма



в) 3-ая форма



г) 4-ая форма



д) 5-ая форма

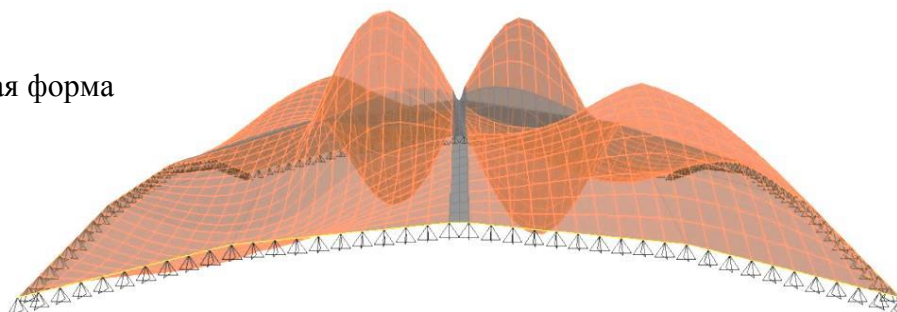


Рис.4.9. Форма собственного колебания складчатых оболочек с УПВ

Алгоритм расчета характеристик УПВ полой складчатой оболочки со сдвиговой УПВ при сейсмических воздействиях показан на рис.4.10. По разработанному алгоритму можно подобрать характеристики УПВ так, чтобы абсолютные значения ускорений складчатой оболочки при землетрясении уменьшились.

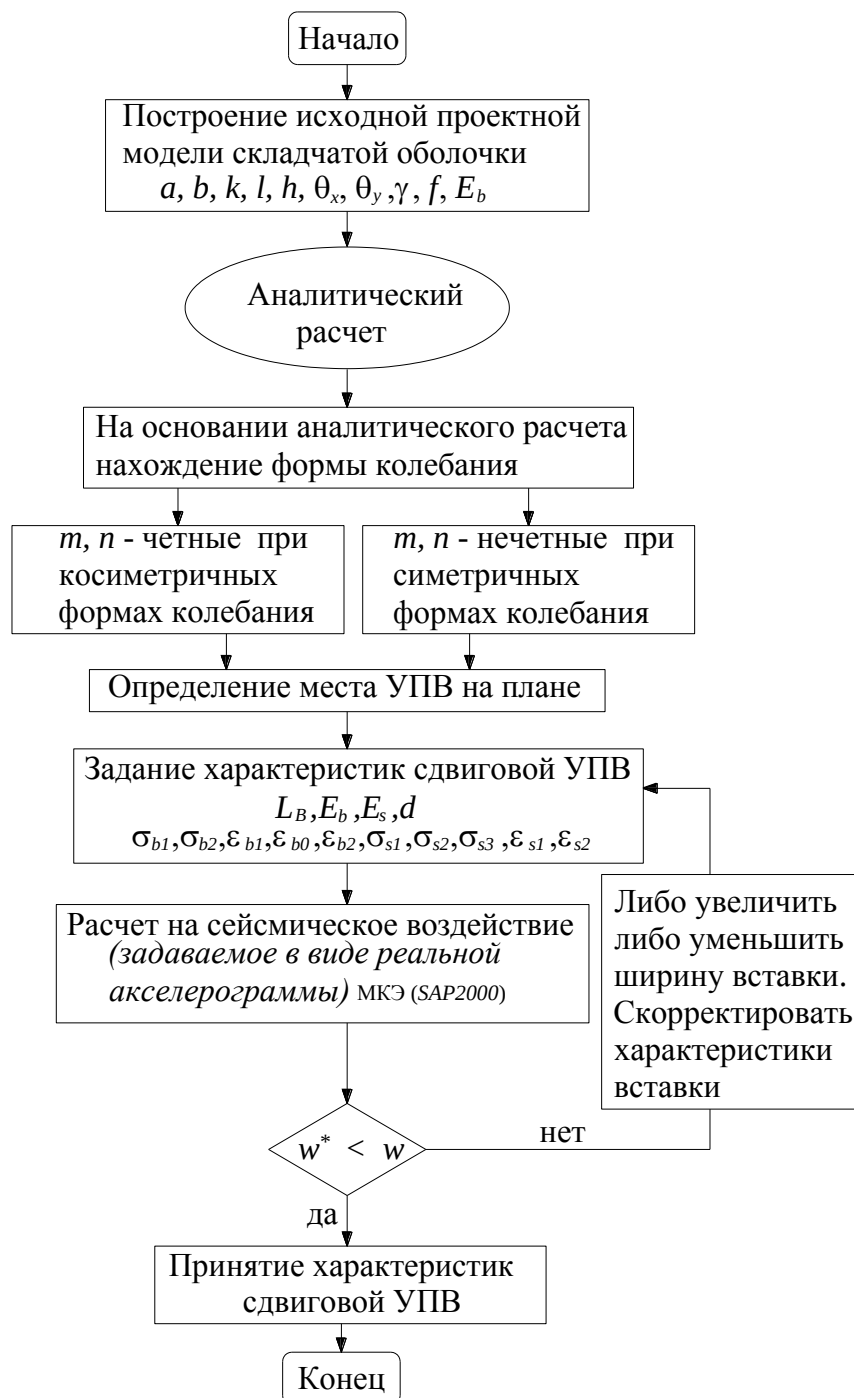


Рис.4.10. Алгоритм расчета характеристик УПВ полой складчатой оболочки

Здесь w^* – максимальное вертикальное перемещение в центральном сечении полой складчатой оболочки с УПВ; w – максимальное вертикальное перемещение в центральном сечении полой складчатой оболочки без УПВ.

По разработанному алгоритму можно подобрать характеристики УПВ так, чтобы вертикальные перемещения складчатой оболочки при землетрясении уменьшились.

Алгоритм расчет складчатой оболочки с УПВ включает 4 шага:

Шаг 1: Построить расчетную модель в виде трехмерной конечно-элементной модели.

1.1. Определить геометрические характеристики пологой складчатой оболочки: размер плиты, толщины оболочки, количество изломов, величины углов изломов срединной поверхности, места и размер УПВ.

1.2. Определить граничные условия.

1.3. Задать количество элементов и узлов.

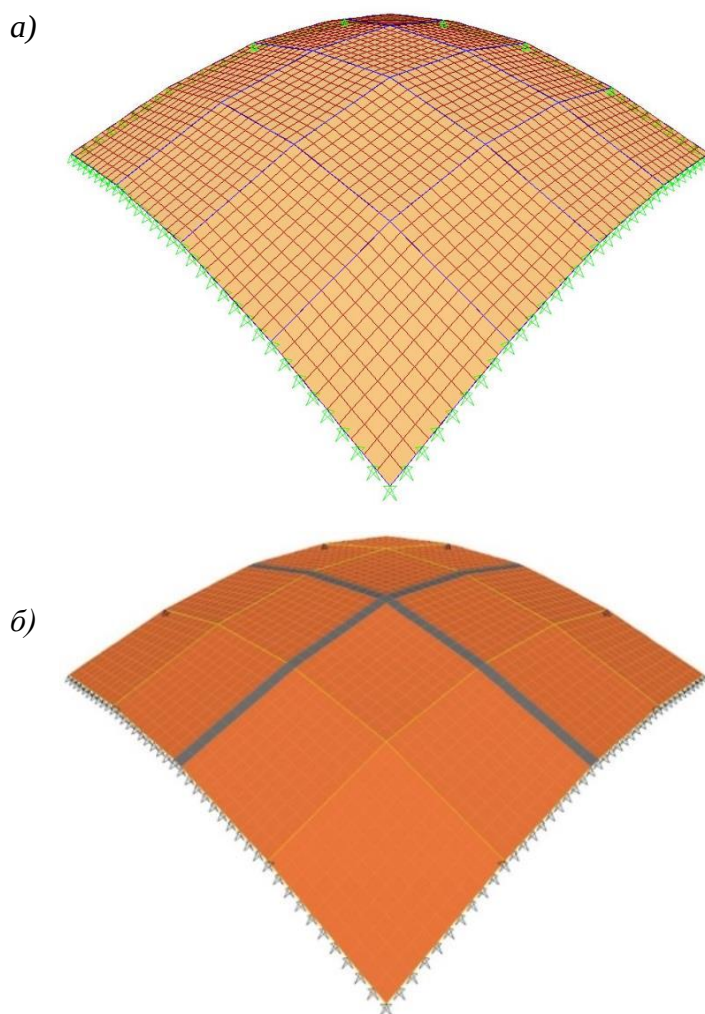


Рис.4.11. Конечно-элементная модель пологой складчатой оболочки 18х18м

a – без УПВ; *б* – с УПВ шириной 0.4м

Шаг 2: Ввести жесткостные и геометрические характеристики

2.1. Ввести жесткостные характеристики плоских элементов оболочки.

Диалоговое окно «Свойство материала» (рис.4.12) позволяет задать жесткостные характеристики элементов оболочки (модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.). Для УПВ выбираем опцию «Нелинейное свойство материала» (рис.4.12.б).

а)

Material Property Data
Свойство материала

General Data — **Общая информация**

Material Name and Display Color: B25 [Color Picker]

Material Type — **Тип материала**: Concrete **бетон**

Material Notes: [Modify/Show Notes...]

Weight and Mass — **Вес и масс**

Weight per Unit Volume: 24.5166

Mass per Unit Volume: 2.5

Units — **Единица**: KN, m, C

Isotropic Property Data — **Изотопное свойство**

Modulus of Elasticity, E — **Модуль упругости**: 300000000

Poisson's Ratio, U — **Коэффициент Пуассона**: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.

Shear Modulus, G — **Сдвиговая модуль**: 13392857

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 22006.123

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor: []

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

б)

Material Property Data Свойство материала

Название материала		
Material Name B10	Material Type – Тип материала Concrete бетон	Symmetry Type Isotropic
Модуль упругости		
Modulus of Elasticity E 18000000	Weight and Mass	
	Weight per Unit Volume 24.5166	Units – Единица KN, m, C
	Mass per Unit Volume 2.5	
Коэффициент Пуассона		
Poisson's Ratio U 0.2	Other Properties for Concrete Materials	
	Specified Concrete Compressive Strength, f'c 20684.274	
	☐ Lightweight Concrete	
	Shear Strength Reduction Factor	
Сдвиговая модуль		
Coeff of Thermal Expansion A 1.170E-05		
	Advanced Material Property Data	
Shear Modulus G 8035714.	Nonlinear Material Data...	
Нелинейное свойство материала	Material Damping Properties...	
	Time Dependent Properties...	
	Thermal Properties...	
OK Cancel		

Рис.4.12. Определение жесткостных характеристик

а - для плиты оболочки; б - для УПВ

2.2. Определение напряжений и деформаций УПВ в нелинейной постановке.

В диалоговом окне «Нелинейное свойство материала» показаны напряжения и деформации в УПВ (рис.4.13).

a)

Nonlinear Material Data
Нелинейный свойство материала

Edit

Material Name **Название материала**
B10

Material Type **Тип материала**
Concrete **бетон**

Hysteresis Type
Elastic

Drucker-Prager Parameters
Friction Angle 0.
Dilatational Angle 0.

Units **Единица**
KN, m, C

Опция определения диаграммы напряжения-деформации

Stress-Strain Curve Definition Options
☐ Parametric
☒ User Defined

Использование параметров напряжения - деформации

User Stress-Strain Curve Data
Количество точек в диаграмме
 Number of Points in Stress-Strain Curve 8

	Деформация	Напряжение	Точка
1	0.	0.	
2	1.890E-04	3600.	
3	2.000E-03	6000.	
4	0.1	6000.	
5	0.0998	-560.	
6	0.05	-560.	
7	0.0502	3600.	
8	0.1	6000.	

Order Rows

Show Plot...

OK Cancel

б)

Nonlinear Material Data
Нелинейный свойство материала

Edit

Material Name **Название материала**
AIII

Material Type **Тип материала**
Steel **Арматура**

Hysteresis Type
Elastic

Drucker-Prager Parameters
Friction Angle
Dilatational Angle

Units **Единица**
KN, m, C

Опция определения диаграммы напряжения-деформации

Stress-Strain Curve Definition Options
☐ Parametric
☒ User Defined

Использование параметров напряжения - деформации

User Stress-Strain Curve Data
Количество точек в диаграмме
 Number of Points in Stress-Strain Curve 11

	Деформация	Напряжение	Точка
1	0.	0.	
2	1.598E-03	319500.	
3	1.775E-03	355000.	
4	1.953E-03	390500.	
5	0.1	390500.	
6	0.0984	0.	
7	0.0966	-355000.	
8	0.06	-390500.	
9	0.0618	0.	
10	0.0636	355000.	
11	0.1	390500.	

Order Rows

Show Plot...

OK Cancel

Рис.4.13. Напряжения и деформации УПВ в нелинейной постановке
а - для бетона; б - для арматуры

2.3. Ввести геометрические характеристики поверхности

Диалоговое окно «Параметры сечения оболочки» (рис.4.14.а) позволяет выбрать тип элемента оболочки. Для плиты оболочки выбираем «тонкая оболочка» и для УПВ выбираем «нелинейная оболочка». Диалоговое окно «Параметры сечения железобетонной оболочки» (рис.4.14.б) позволяет определить класс бетона, арматуры и толщину УПВ. В данном окне можно определить количество, диаметр арматуры и расстояние между стержнями.

a)

Shell Section Data

название элемента
Section Name: V100
Section Notes: Modify/Show...
Display Color: [Color Swatch]

Type - тип элемента
☒ Shell - Thin тонкая оболочка
☐ Shell - Thick
☐ Plate - Thin
☐ Plate Thick
☐ Membrane
☐ Shell - Layered/Nonlinear оболочка - нелинейный
 Modify/Show Layer Definition...

Material - материал
 Material Name: + B25
 Material Angle: 0.

Thickness - толщина
 Membrane: 0.1
 Bending: 0.1

Concrete Shell Section Design Parameters
 Modify/Show Shell Design Parameters...

Stiffness Modifiers
 Set Modifiers...

Temp Dependent Properties
 Thermal Properties...

OK Cancel

б)

Concrete Shell Section Quick Start Parameters

Название элемента **Параметры сечения железобетонной оболочки**

Section Name: Rebar Layers: ☐ One Layer ☒ Two Layers Units: **Единица**

Параметры материала и толщина бетона

Material Data And Concrete Thickness

Concrete Material: Rebar Material: Concrete Thickness: **толщина бетона**

Диаметр арматуры, интервал

Rebar Size, Spacing and Clear Cover

☐ Size and Spacing Is the Same For All Rebar

Top Bars - Direction 1: @ Cover: Top Bars - Direction 2: @ Cover:

Bottom Bars - Direction 1: @ Cover: Bottom Bars - Direction 2: @ Cover:

Вид сечения оболочки

Shell Section Elevation View

Top: **Верх** Bottom: **Низ**

☒ Show Elevation 1-3 ☐ Show Elevation 2-3

Shell Section Plan View

☒ Top ☐ Bot

OK Cancel

Рис.4.14. Определение геометрических характеристик

а - для плиты оболочки; б - для УПВ

Шаг 3: Определить и ввести сейсмические нагрузки

Сейсмическую нагрузку согласно [79] зададим акселерограммой типа Эль-Центро (рис.4.15).

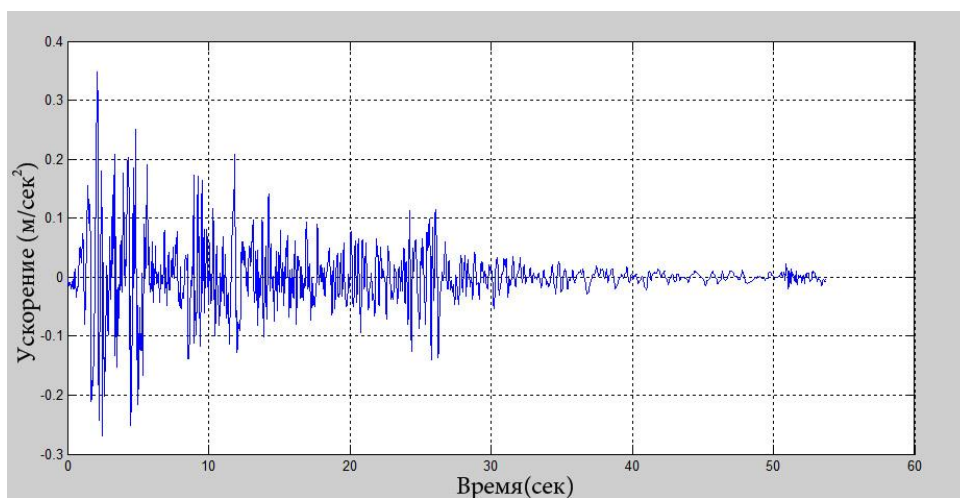


Рис.4.15. Акселерограмма землетрясения Эль-Центро

Шаг 4. Анализ результатов расчета

Анализ результатов позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов.

4.4. Определение напряжений, вертикальных перемещений и абсолютных ускорений.

Изменение ускорения в центральном сечении складчатой оболочки 18х18м без УПВ и с УПВ при сейсмической нагрузке показано на рис.4.16

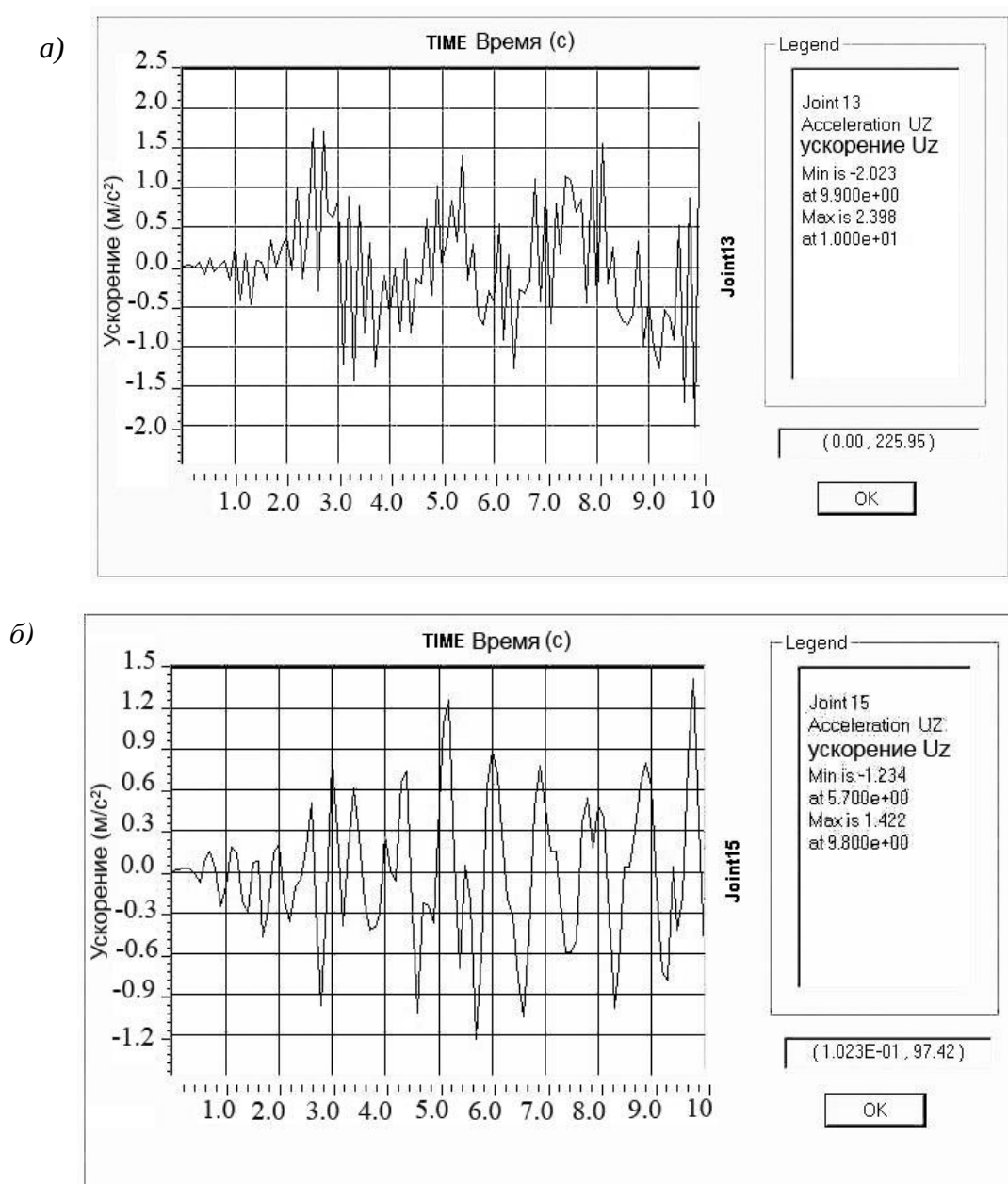


Рис.4.16. Изменение ускорения в центральном сечении оболочки 18х18м:

а – без УПВ; б – с УПВ шириной 0.4м

В таблице 4.4 приведено сравнение результаты расчета ускорений центрального сечения складчатой оболочки без УПВ и с УПВ при сейсмическом воздействии.

Таблица 4.4

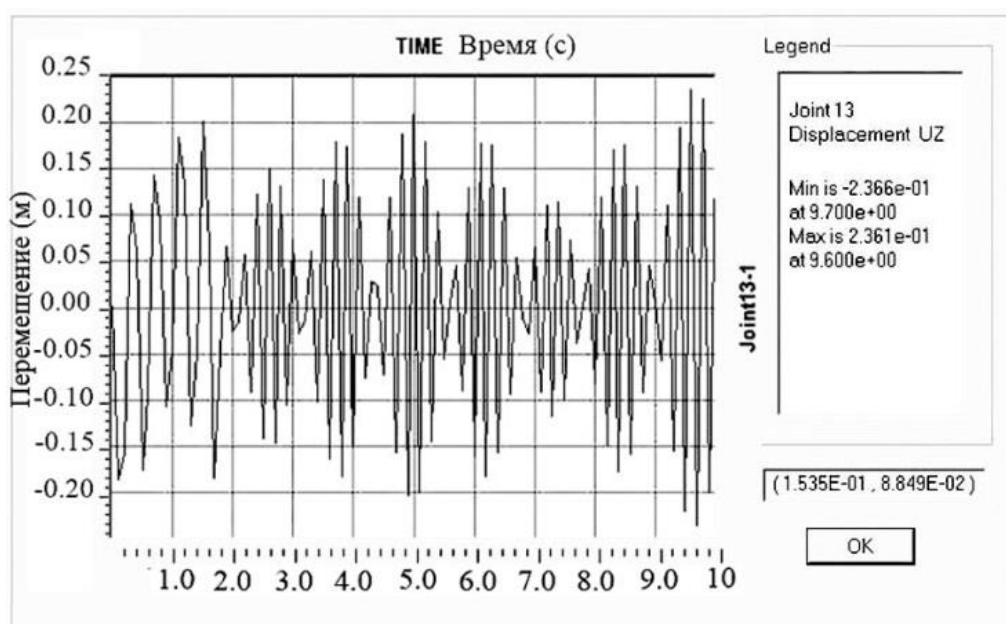
Ускорения складчатой оболочки 18х18м без УПВ и с УПВ

Варианты оболочки	Ускорение (м/с ²) (SAP 2000)		Ускорение (м/с ²) (ANSYS)	
	Max	Min	Max	Min
Пологая складчатая оболочка 18х18м без УПВ (u)	2.39	-2.02	2.56	-2.31
Пологая складчатая оболочка 18х18м с УПВ шириной 0.4м (u^*)	1.42	-1.23	1.65	-1.38

Численный эксперимент показал удовлетворительную сходимость результатов, полученных двумя различными программами «SAP2000» и «ANSYS».

Вертикальное перемещение складчатой оболочки 18х18м без УПВ и с УПВ шириной 0.4м в центральном сечении при сейсмическом воздействии. Результаты расчёта показаны на рис. 4.17.

a)



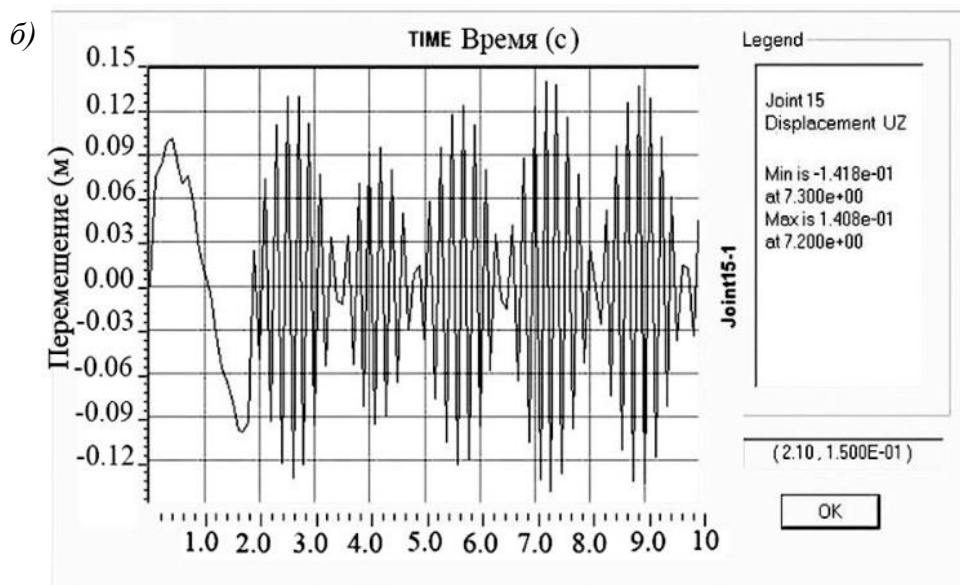


Рис.4.17. Вертикальное перемещение в центральном сечении складчатой оболочки
18x18м: а – без УПВ; б – с УПВ шириной 0.4м

В таблице 4.9 приведено сравнение результатов расчета вертикального перемещения в центральном сечении складчатой оболочки без УПВ и с УПВ при сейсмическом воздействии. Предельное перемещение получено из таблицы 4.9.

Таблица 4.5

Вертикальные перемещения в центральном сечении

Варианты оболочки	Расчетное перемещение (м)		Предельное перемещение для УПВ (м)
	Max	Min	
Пологая складчатая оболочка 18x18м без УПВ	0.23	-0.23	-0,45
Пологая складчатая оболочка 18x18м с УПВ шириной 0.4м	0.140	-0.141	

Исследуем напряжения в плитах. Изменение напряжений в центральной плите складчатой оболочки 18x18м без УПВ и с УПВ шириной 0.4м на сейсмические воздействия показано рис.4.18.

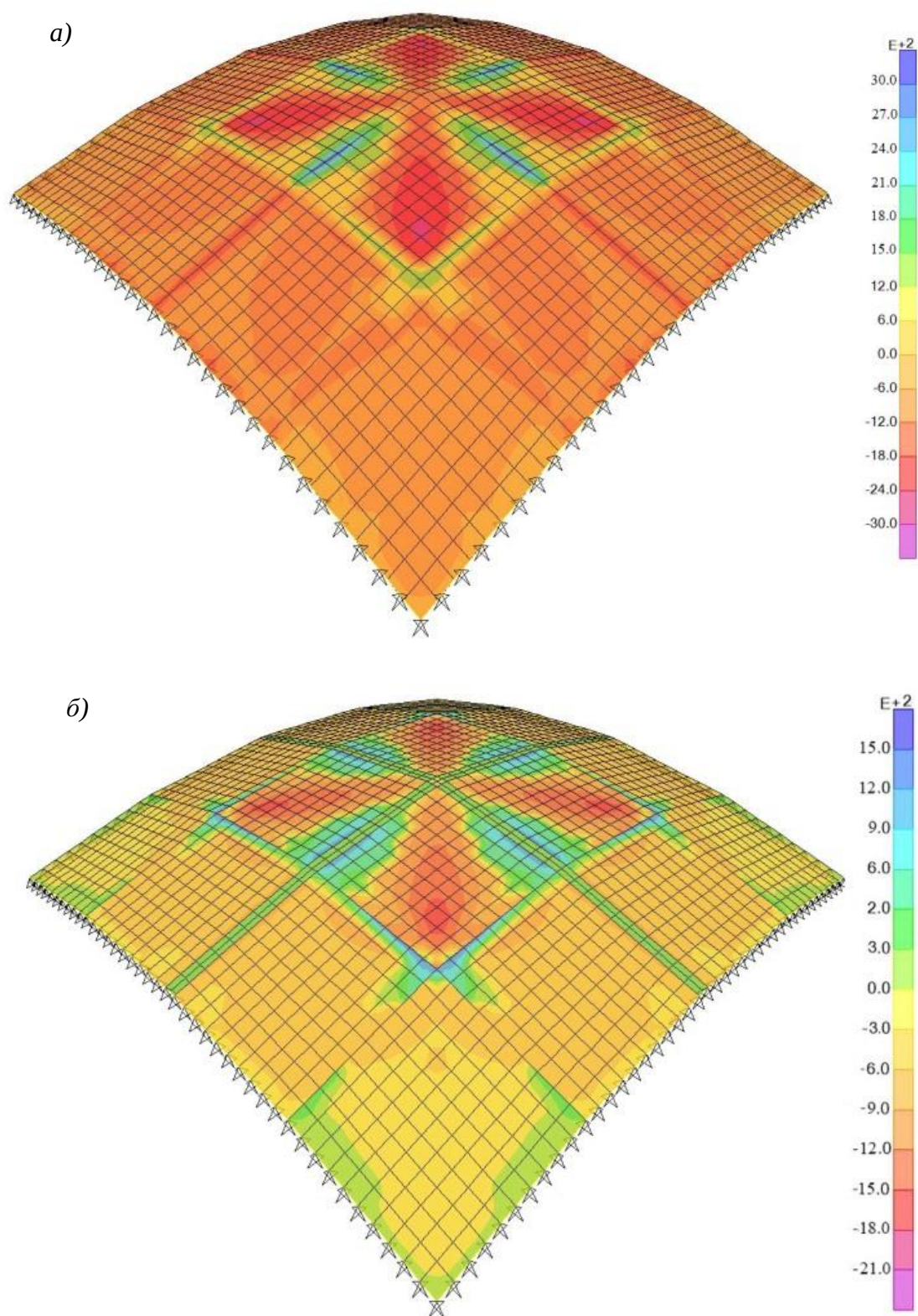


Рис.4.18. Напряжения в центральной складчатой оболочке 18х18м:

a – без УПВ; *б* – с УПВ шириной 0.4м

В таблице 4.6 приведены максимальные и минимальные нормальные напряжения в центральной складчатой плите оболочки без УПВ и с УПВ при сейсмических воздействиях.

Таблица 4.6

Напряжения в центральной плите оболочки

Тип оболочки	$\sigma_{\max}$ (кН/м ²)	$\sigma_{\min}$ (кН/м ²)
Пологая складчатая оболочка 18х18м без УПВ	2132	-92.81
Пологая складчатая оболочка 18х18м с УПВ шириной 0.4м	940.2	-23.01

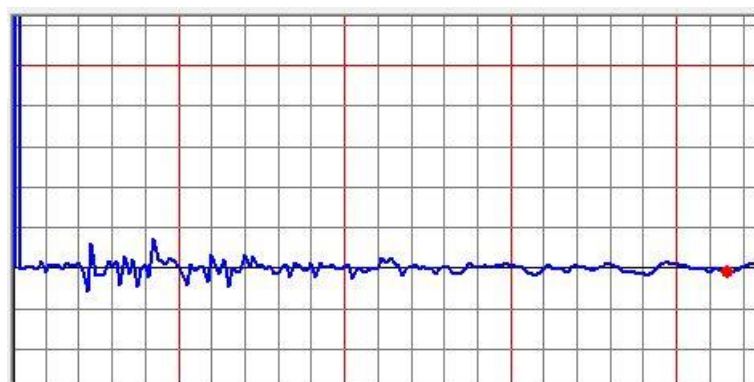
Выведем безразмерный параметр демпфирующего коэффициента, как отношение вертикальных перемещений складчатой оболочки без УПВ к вертикальным перемещениям складчатой оболочке со сдвиговой УПВ

$$k_0 = \frac{w}{w^*}, \quad (4.25)$$

где w и w^* вертикальное перемещение в центральном сечении пологой складчатой оболочки без УПВ и с УПВ соответственно.

Для верификации разработанного метода рассчитаем оболочку по различным акселерограммам (рис.4.19).

а)



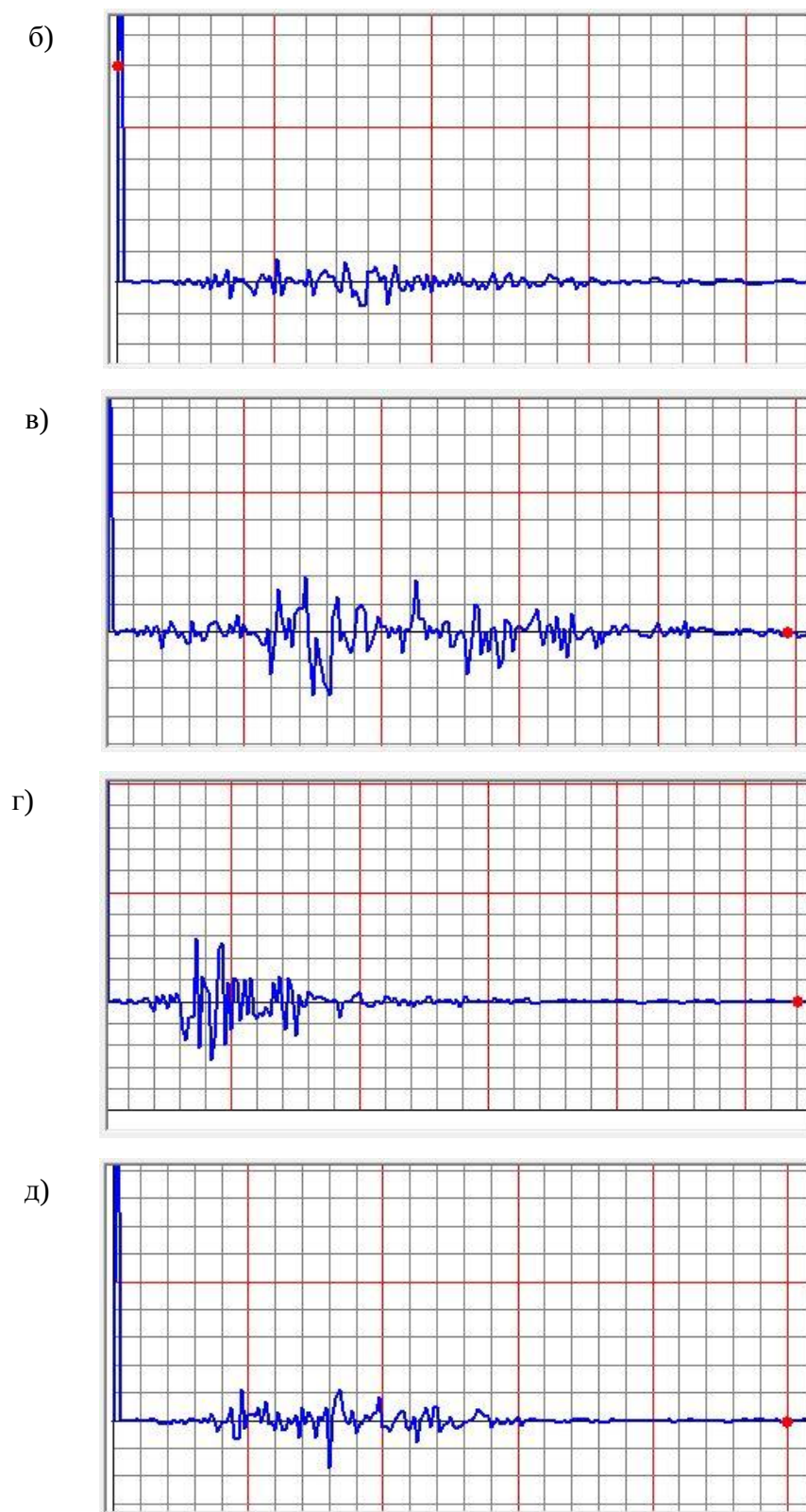


Рис.4.19. Записи акселерограмм

а - Холистер; б – Ласснор; в – Луссерне; г – Ньюхолл; д- Смоника

В таблице 4.7 приведены результаты расчета вертикального перемещения, демпфирующего коэффициента и нормального напряжения складчатой оболочки 18х18м по различным акселерограммам.

Таблица 4.7

Сравнение результатов расчета складчатой оболочки 18х18м на сейсмическое воздействие по различным акселерограммам

Запись акселерограммы			Вертикальное перемещение (м)		Демпфирующий коэффициент $k_0 = \frac{w}{w^*}$	Нормальное напряжение (кН/м ²)	
			без УПВ (w)	с УПВ (w*)		без УПВ ($\sigma \cdot 10^{+02}$)	с УПВ ($\sigma \cdot 10^{+02}$)
1	Холистер (Holliste)	Min	-0.232	-0.139	1.66	-9.21	-3.69
		Max	0.231	0.138	1.67	51.30	23.90
2	Ласснор (Lassnor)	Min	-0.207	-0.096	2.15	-7.41	-3.32
		Max	0.212	0.095	2.23	36.30	21.50
3	Луссерне (Lucerne)	Min	-0.190	-0.099	1.91	-6.95	-2.74
		Max	0.186	0.100	1.86	38.42	18.85
4	Newhall (Ньюхолл)	Min	-0.312	-0.134	2.32	-8.41	-4.60
		Max	0.304	0.132	2.30	51.9	22.87
5	Smonica (Смоника)	Min	-0.188	-0.130	1.44	-7.57	-3.44
		Max	0.186	-0.131	1.41	35.05	25.54

Анализ результатов таблицы 4.7 позволяет сделать вывод, что разработанный численный метод дает согласующиеся результаты, что в какой-то мере подтверждает достоверность предлагаемого метода.

4.5. Разработка рекомендаций для подбора характеристик УПВ для уменьшения амплитуд колебаний в складчатых оболочках

Получены новые численные результаты критических сдвиговых $G_{кр}$ и предельных $G_{пр}$ нагрузок для одного погонного метра вставки различной ширины L_B с различным диаметром арматуры d . Результаты расчетов сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8.

Критическая и предельная вертикальная нагрузка для одного погонного метра УПВ

Диаметр арматуры	Вертикальная нагрузка (кН)							
	$L_B = 0,1$ м		$L_B = 0,2$ м		$L_B = 0,3$ м		$L_B = 0,4$ м	
	Гкп	Гпр	Гкп	Гпр	Гкп	Гпр	Гкп	Гпр
$d = 10$ мм	85.29	105.1	41.49	52.28	28.68	34.61	19.33	26.14
$d = 12$ мм	151.0	181.5	72.36	90.82	45.09	60.86	34.36	45.41
$d = 14$ мм	241.3	289.0	116.5	143.4	78.36	96.77	49.21	71.21
Диаметр арматуры	Вертикальная нагрузка (кН)							
	$L_B = 0,5$ м		$L_B = 0,6$ м		$L_B = 0,7$ м		$L_B = 0,8$ м	
	Гкп	Гпр	Гкп	Гпр	Гкп	Гпр	Гкп	Гпр
$d = 10$ мм	15.33	20.77	14.02	17.31	11.50	14.91	9.78	13.05
$d = 12$ мм	27.66	35.94	22.75	29.89	17.71	25.76	17.39	22.46
$d = 14$ мм	44.49	58.10	36.61	47.99	29.10	40.91	28.05	35.86

Для применения УПВ были проведены исследования, которые показывают предельные вертикальные перемещения арматуры (таблице 4.9).

Таблица 4.9

Значение предельного вертикального перемещения арматуры

$d, \text{ мм} \backslash l, \text{ мм}$	100	200	300	400	500	700	800
8	50	180	370	700	1100	2100	2500
10	35	140	320	550	840	1700	2200
12	30	110	270	450	670	1400	1900
14	20	80	220	380	410	950	1250

По алгоритму (рис.4.20) произведен подбор характеристик УПВ для снижения амплитуд колебаний при различных параметрах пологих складчатых оболочках. Результаты расчета и рекомендации для подбора характеристик УПВ для складчатых оболочек, составленных из плоских элементов, на квадратном плане показаны в таблице 4.10.

Таблица 4.10

Рекомендация подбора характеристик УПВ для пологих складчатых оболочек на квадратном плане

Интервалы линейных размеров плана оболочки (м)	Размер УПВ (м)	Толщина оболочки (м)	Арматуры (АIII) - А400		Бетон	
			Диаметр d (мм)	Интервал между стержнями (мм)	Для плит	Для УПВ
10 - 20	0,3 – 0,5	0,10	10 - 12	80 -100	B20, B25	B10, B12.5
20 - 30	0,5 – 0,8	0,10	10 - 12	80 -100	B20, B25	B10, B12.5
30 - 40	0,8 – 1,2	0,15	14 - 16	100 -120	B25	B15
40 - 50	1,2 – 1,6	0,20	14 - 16	100 -120	B30	B15
50 - 60	1,6 – 2,0	0,20	14 - 16	100 -120	B30	B15

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты настоящей работы состоят в следующем:

1. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчета складчатых оболочек без УПВ и с УПВ по двум программам («SAP2000» и «ANSYS») и по различным акселерограммам, а также определения частот свободных колебаний гладких и складчатых оболочек разработанным и аналитическим методами, что подтверждает достоверность предлагаемого метода.
2. Выявлено, что для складчатых оболочек рациональным способом сейсмозащиты является применение сдвиговых упругопластических вставок (УПВ), поскольку при колебаниях возникают сдвиговые усилия в стыках плоских элементов и они будут восприниматься арматурой УПВ.
3. Разработанный метод для определения рационального места положения сдвиговой УПВ в складчатой оболочке позволяет дать рекомендации проектировщикам разрабатывать конструкции складчатых пологих оболочек с возможностью уменьшить амплитуды колебаний оболочки.
4. Разработанный метод подбора характеристик УПВ позволяет рационально подобрать геометрические и жесткостные характеристики УПВ при различных параметрах оболочки.
5. Разработанный численный метод расчета, позволяющий учесть демпфирующие свойства УПВ при сейсмических воздействиях, позволил установить, что использование УПВ позволяет уменьшить напряжения в элементах тонкой полой складчатой оболочки с тремя изломами в двух взаимно перпендикулярных направлениях с размером плана оболочки 18х18 м в 2-4 раза, вертикальные перемещения центрального сечения примерно в 2 раза и абсолютные ускорения в 1,5–1,7 раза.
6. Результаты исследований уже нашли применение в практической области и подтверждены справкой о внедрении, выданной фирмой «Вьетнамское инвестиционное консультирование и строительное проектирование» (CDC), <http://www.cdc.biz.vn>.

7. Исследование работы упругопластических вставок в конструкции оболочки позволяет сделать вывод, что УПВ весьма эффективны и целью дальнейших исследований будет выявить влияние УПВ на динамические характеристики оболочки при постановке УПВ в опорных устройствах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Амбарцумян, С.А.** Теория анизотропных оболочек / С.А. Амбарцумян // Физматгиз. – М. – 1961. – 384 с.
- [2] **Амосов, А.А.** Основы теории сейсмостойкости сооружений / А.А. Амосов, С.Б. Синицын // Учебное пособие. Изд-во АСВ. – М. – 2001. – 96 с.
- [3] **Айзенберг, Я.М.** Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений / Айзенберг Я.М., А.И. Нейман, А.Д. Абакаров, и др // От вред. С.В. Медведев. Наука 1978. – М.– 246с.
- [4] **Айзенберг, Я.М.** Эффективные системы сейсмоизоляции. Исследования, проектирование, строительство. / Я.М.Айзенберг, В.И. Смирнов, С.И. Бычков, Ю.А. Сутырин // Сейсмостойк. Стр-во. Безопасность сооружений. – №1. –2002.– С.31-37.
- [5] **Агапов, В.П.** Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций / В.П. Агапов // учеб. пособие – М. : Изд-во АСВ, –2004. – 248 с.
- [6] **Агранович, М. С.** Обобщенные функции / М. С. Агранович // Издательство: МЦНМО. –128с.
- [7] **Атисков А.Ю.** Компьютерные технологии расчета оболочек / А.Ю. Атисков, Д.А. Баранова, В.В. Карпов, Л.П. Москаленко, А.А. Семенов. – СПб.: СПбГАСУ, –2012. – 184 с.
- [8] **Асланян, А.Г.** Распределение собственных частот тонкой упругой оболочки произвольного очертания / А.Г. Асланян, З.Н. Кузьмина, В.Б. Лидский, В.Н. Туловский // ПММ. – 1973. – №4. – С.37.
- [9] **Бате К.** Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Р. Вильсон // Пер. с англ. Стройиздат. – М. –1982. – 447с.
- [10] **Бреславский, В. Е.** О колебаниях цилиндрических оболочек / В. Е. Бреславский // Инженерный сборник. том XVI. – 1953.
- [11] **Богданович, А.Е.** Нелинейные задачи динамики цилиндрических композитных оболочек / А.Е. Богданович // Рига. – Зинате, – 1987. – 295 с.

- [12] **Болотин, В.В.** О плотности частот собственных колебаний тонких упругих оболочек / В.В. Болотин // ПММ. –1963. – № 2. – С. 27.
- [13] **Бородачев, Н.И.** О решении динамической задачи для пологих оболочек / Н.И. Бородачев // Научные доклады высшей школы. Стр-во. – 1958. – № 2.
- [14] **Вайнберг, Д.В.** Расчет пластин и оболочек с разрывными параметрами [текст] / Д.В. Вайнберг, И.З. Ройтфарб // Расчет пространственных конструкций. – М. – 1969. –Вып.10. – С.39-80.
- [15] **Власов, В.З.** Общая теория оболочек и ее приложение к технике / В.З. Власов // Гостехиздат. – М. – 1949.
- [16] **Вольмир, А.С.** Гибкие пластинки и оболочки / А.С. Вольмир //Гос. Изд-вотехн. – теорет. Лит. – М. – 1965. – 420 с.
- [17] **Вольмир, А.С.** Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А.С. Вольмир // Наука. – 1972. – 320 с.
- [18] **Гельфанд, И.М.** Обобщённые функции и действия над ними / И.М. Гельфанд, Г.Е. Шиллов // Государственное издательство физико-математической литературы. – М. –1959. – 470 с.
- [19] **Гольденвейзер, А.Л.** Свободные колебания тонких упругих оболочек / А.Л. Гольденвейзер, В.Б. Лидский, П.Е. Товстик // Наука. – М. –1979. – 384 с.
- [20] **Голых, О. В.** Упруго-пластические вставки в зданиях сложной макроструктуры, их жесткостные характеристики и влияние на напряженно-деформированное состояние зданий при неравномерной осадке / О.В. Голых, К.Т. Нгуиен, Х.А. Данг // Вестник гражданских инженеров. – 2010. – №1(22) – С.51–55.
- [21] **Гонткевич, В.С.** Собственные колебания пластинок и оболочек / В.С. Гонткевич // Наукова думка. – Киев. – 1964. – 288 с.
- [22] **Гольденблат, И.И.** Модели сейсмостойкости сооружений / И.И. Гольденблат, Н.А.Николаенко, С.В.Поляков, С.В. Ульянов // Отв. Ред. В.Я.Иванин – М. –1979. –252 с.

- [23] **Григолюк, Э.И.** Нелинейные колебания и устойчивость пологих оболочек и стержней / Э.И. Григолюк // Изв. АН СССР, отдел техн.наук. – М. 1955. – № 3. – С.33-68.
- [24] **Дашевский М.А.** Защита музыкального комплекса от вибрации, вызываемой движением автотранспорта / М.А. Дашевский, Е.М. Миронов, В.В. Моторин // Сейсмостойк. Стр-во. Безопасность сооружений. –№2. –2002. – С.55.
- [25] **Дрожжинов Ю.Н.** Введение в теорию обобщенных функций / Ю.Н. Дрожжинов, Б.И. Завьялов // – М., –2006. –160с.
- [26] **Деркачев А.А.** Исследования диссипативных свойств стержневых конструкций с упругофрикционными соединениями на высокопрочных болтах / А.А. Деркачев, В.С. Давыдов, С.Н. Клигерман // Сейсмостойкое строительство: Реф. – Сб. ВНИИИС Сер.14. Вып.3 –1981.– С.7-10.
- [27] **Ильичев, Е.А.** Свободные колебания призматических оболочек многосвязного сечения: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.17 / Е.А. Ильичев. – Вологда., –2000. – 158с.
- [28] **Иосиф, Ф.** Обобщенные аналитические функции / Ф. Иосиф // ЁЁ Медиа., – 1988. – 507с.
- [29] **Карпов, В.В.** Численные методы решения задач строительной механики / В.В. Карпов, В. П. Ильин, А. М. Масленников // - СПб.: СПбГАСУ, 2005. – 425 с.
- [30] **Карпов В.В.** Геометрические нелинейные задачи для пластин и оболочек и методы их решения / В.В. Карпов // М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ. –1999. – 154 с.
- [31] **Карпов В.В.** Математическое моделирование, алгоритмы исследования модели. вычислительный эксперимент в теории оболочек / В.В. Карпов // – СПб.: СПбГАСУ, –2006. – 330 с.
- [32] **Карпов В.В.** Вариационно-параметрический метод в нелинейной теории оболочек ступенчато-переменной толщины. / В.В. Карпов, О. В. Игнатьев, В. Н. Филатов // – Волгоград: ВолГАСА. –2001. – 210 с.

- [33] **Карпов В.В.** Нелинейные математические модели деформирования оболочек переменной толщины и алгоритмы их исследования / В.В. Карпов // М.: АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2002 – 420 с (в соавторстве О. В. Игнатьев, А. Ю. Сальников);
- [34] **Карпов В.В.** Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения: В 2 ч. часть 1. Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. / В.В. Карпов // – М.: ФИЗМАТЛИТ, –2010. – 288 с.
- [35] **Карпов В.В.** Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения: В 2 ч. часть 2. Вычислительный эксперимент при статическом механическом воздействии. / В.В. Карпов // – М.: ФИЗМАТЛИТ, –2011. – 248 с.
- [36] **Кондратьева, Л.Н.** Исследование частот и форм свободных колебаний сборных оболочек из плоских элементов / Л.Н. Кондратьева // Агрокомплекс Сибири и Дальнего Востока. – Благовещенск. – 1990. – С.43.
- [37] **Кондратьева, Л.Н.** Вынужденные нелинейные колебания складчатой оболочки / Л.Н. Кондратьева // Актуальные проблемы современного строительства. – Благовещенск. –1999. – С.31.
- [38] **Кондратьева, Л.Н.** Вынужденные нелинейные колебания складчатой цилиндрической оболочки под действием периодической поперечной нагрузки / Л.Н. Кондратьева // Тр. молодых ученых. 4.V.: Изд-во СПбГАСУ, – СПб. – 1999. – С.87-90.
- [39] **Кондратьева, Л.Н.** Свободные нелинейные колебания пологих оболочек с изломами срединной поверхности в двух направлениях / Л.Н. Кондратьева // Докл. 57 науч. конф. СПбГАСУ. – СПб. – 2000. – С.60 - 62.
- [40] **Кондратьева, Л.Н.** Напряженно-деформированное состояние, устойчивость и колебания тонких пологих оболочек с изломами поверхности в линейной и геометрически нелинейной постановках / Л.Н. Кондратьева // – СПб. – 2001.
- [41] **Кондратьева, Л.Н.** Методика аналитического определения частот свободных колебаний пространственных покрытий форме многогранников / Л.Н. Кондратьева

// Вестник гражданских инженеров № 1 (30), СПбГАСУ. – СПб. –2012. – С.108-111.

[42] **Кондратьева, Л.Н.** Свободные колебания пологих трехслойных оболочек с малыми изломами поверхности: дис....канд. техн. наук: 05.23.17 / Л.Н. Кондратьева. – СПб., –1989. – 104с.

[43] **Койфман, Ч.Н.** Колебания пологой в плане конструктивно-ортотропной оболочки / Ч.Н. Койфман // Динамика и прочность машины. Вып.8. Издаво Харьковского ун-та.

[44] **Костючек, Н.В.** Динамический расчет круговых цилиндрических оболочек методом начальных функций: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.17 / Н.В. Костючек. – СПб., –1995. – 193с.

[45] **Коренева, Б. Г.** Справочник по динамике сооружений / Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича // Стройиздат. – М. –1972. –510с.

[46] **Клаф Р.** Динамика сооружений / Р. Клаф, Д.Ж. Пензиен // Пер. с англ.: стройиздат. – М. –1979. –320с.

[47] **Климник, Л.Ш.** Проектирование каркасных зданий для сейсмических районов с упругофрикционными соединениями на высокопрочных болтах / Л.Ш. Климник // Сейсмостойкое строительство: Реф. – Сб./ ЦИНИС Сер.14. –1977. Вып.5 – С.12-17.

[48] **Лебедев, А.В.** Численные методы расчета строительных конструкций: / А.В. Лебедев // учеб. Пособие. СПбГАСУ. – СПб., –2012. – 55 с.

[49] **Леонид Волевич.** Обобщенные функции и уравнения в свертках / Леонид Волевич, Семен Гиндикин // ФИЗМАТЛИТ. –1994. – 336 с.

[50] **Ляв. А.** Математическая теория упругости / А. Ляв // – М. – 1935. – 201с.

[51] **Масленников А.М.** Расчет строительных конструкций численными методами / А.М. Масленников // Изд-во Ленингр. Ун-та. – Л. –1987. – 224с.

[52] **Миргородский, А.В.** Численное исследование колебаний однородных и многослойных оболочек в геометрически нелинейной постановке: дис.... канд. техн. наук: 05.23.17 / А.В. Миргородский. – Москва., – 2004. – 137с.

- [53] **Микусинский, Я.** Элементарная теория обобщенных функций / Я. Микусинский, Р.Сикорский // Изд-во иностранной литературы – М. – 1959. – 78с.
- [54] **Милейковский, И.Е.,** Вариационные методы исходных уравнений в применении к расчету призматOIDов / И.Е. Милейковский // Труды ЦНИИСК, Вып.13. – 1970. – 95 с.
- [55] **Милейковский, И.Е.** Расчет тонкостенных конструкций / И.Е. Милейковский // Стройиздат. – М. –1989. – 200с.
- [56]**Михайлов, Б.К.** Свободные колебания пологих трехслойных оболочек, составленных из плоских элементов / Б.К. Михайлов, Л.Н. Кондратьева, // Деп. В ВИНТИ 12,07,87, №3937-B87 ЛИСИ; –Л. – 1987. –17 с.
- [57] **Михайлов, Б.К.** Устойчивость оболочки, имеющей нарушения сплошности / Б.К. Михайлов, В.Г. Москалева, Г.О. Кипиани // Изв.ВУЗов. Строительство и Архитектура. –1993. – № 3. – С.28-30.
- [58] **Михайлов, Б.К.** Пластины и оболочки с разрывными параметрами / Б.К. Михайлов // Изд-во ЛГУ. – Л. –1980. –196 с.
- [59] **Михайлов Г.М.** Использование упругофрикционных систем в сейсмостойком строительстве / Г.М. Михайлов // Стр-во и архитектура. Сер.14 Сейсмостойк. Стр-во: Науч-техн Реф. – Сб. –1974.– С.3-5.
- [60] **Михайлов, В.К.** Задача о колебаниях тонкой полой оболочкой с различными граничными условиями / В.К. Михайлов, В.К., Н.Р. Степанова, Л.Н. Кондратьева // Эффективные численные методы решения краевых задач механики твердого деформируемого тела: Тез.докл. Республиканской научно-технической конференции/ХИСИ. – Харьков. – 1989. – С. 45-46.
- [61] **Назаров, А.А.** Импульсивные функции в приложении к задачам строительной механики / А.А. Назаров // Исследования по теории сооружений: Сб.вып. Стройиздат, – М. –1949. – С. 43-58.
- [62] **Назаров А.А.** Некоторые контактные задачи теории оболочек / А.А. Назаров // Доклады АН. Армянской ССР. том IV. – 1948. – № 2.– С. 96-102.

- [63] **Оболашвили, Е.И.** Построение общего интеграла системы дифференциальных уравнений колебаний сферической оболочки через аналитические функции комплексной переменной и некоторые его применения. Автореф. Дисс. ... канд. физ-мат. наук. Тбилиси, –1952. 21 с.
- [64] **Ониашвили, О.Д** Некоторые динамические задачи теории оболочек / О.Д. Ониашвили // М. : Изд. АН СССР, 1957, 196 с.
- [65] **Окладникова, Е.В.** Колебания и устойчивость пологих трехслойных оболочек с изломами поверхности. дис.... канд. техн. наук: 05.23.17 / Е.В. Окладникова. – М., –2005. – 100с.
- [66] **Поялков, В.С.** Современные методы сейсмозащиты зданий / В.С. Поялков, Л.Ш. Климник, А.В. Черкашин // Стройиздат. – М. – 1989. –319 с.
- [67] **Поляков, С.В.** Экспериментальное строительство и натурные испытания зданий общежития во Фрунзе с сейсмоизолирующим скользящим поясом в фундаменте / С.В. Поляков, Л.Ш. Климник // Стр-во и архитектура. Сер.14 Сейсмостойк. Стр-во: Науч-техн. Реф. – Сб. –1982.– С.11-15.
- [68] **Потапов В.Д.** Динамика и устойчивость упругих систем / А.В. Александров, В.Б. Зылев // Высшая школа. – М. – 2008.
- [69] **Плетнёв, В.И.** Экспериментальное исследование деформационных швов различной ширины в перемычках зданий сложной макроструктуры / В.И. Плетнёв, Сао Трунг Нгуиен // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – №1(26) – С.55–57.
- [70] **Плетнёв, В.И.** Компенсация экстремальных воздействий на здания сложной макроструктуры рамного типа с помощью упруго-пластических шарниров / В.И. Плетнёв, Нгуиен Сао Трунг // Докл. 67-й науч. конф. проф., преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-та / С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2010. –Ч. I. – С. 150–153.
- [71] **Рассказов А.О.** Расчет собственных частот шарнирно-опертых слоистых оболочек на прямоугольном плане. Динамика и прочность машин / А.О. Рассказов, И.И. Соколовская, Н.А. Шульга // Вып. 36. – 1982. – С.85-89.

- [72] **Рэлей, Дж.У.** Теория звука / Дж.У. Рэлей // М. – Л. – 1940. – 49 с.
- [73] **Рутман, Ю.Л.** Определение параметров силовой диаграммы пластически деформируемых элементов конструкции / Ю.Л. Рутман, Н.В. Ковалева, В.Р.Скворцов // сб. трудов науч. Межд. Конф. ВЕМ&FEM – СПб. – 2007
- [74] **Самсонов, А.В.** Рациональное проектирование конструкций и пружинной изоляции зданий, подвергающихся динамическим воздействиям. дис.... канд. техн. наук: 05.23.17 / А.В. **Самсонов**. – СПб., – 2003. – 158с.
- [75] **Саликова, Е.В.** Применение метода свободных колебаний для определения внутренних дефектов в клееной фанере: дис...канд. техн. наук: 05.21.05 / А.В. Саликова – Кострома. – 2004. – 146с.
- [76] **Савович, М.К.** Использование программного комплекса SAP 2000 для решения инженерных задач // Савович М.К., Каменцев Д.В.: Учебно-методическое пособие. – Ханты-Мансийск: РИЦ ЮГУ, – 2004. – 25с.
- [77] **Семенов, А.А.** Проектно-вычислительный комплекс SCAD в учебном процессе / А.А. Семенов, А.И. Габитов // Часть I. Статический расчет : учеб. пособие – М. : Изд-во АСВ, – 2005. – 152 с.
- [78] Руководство по проектированию виброизоляции машин и оборудования. Стройиздат. – М. – 1972. – 1959 с.
- [79] Сведение Эль-центро [Электронный ресурс] :URL: <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>
- [80] **Скориков, А.В.** Свободные колебания пологих оболочек при различных краевых условиях. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.17 / А.В. Скориков. – М., – 1989. – 18 с.
- [81] **Смирнов, А.А.** Особенности расчета здания сложной макроструктуры на ветровые и сейсмические нагрузки и их рациональное проектирование: дис. ... канд. Техн. Наук. : 05.23.17 / А.А. Смирнов – СПб., – 2008. – 167 с.
- [82] **Синицын, С Б.** Теория сейсмостойкости : курс лекций / С.Б. Синицын ; М-во образования и науки Росс. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. – М. – 2014. — 88 с

- [83] **Сорокин, Е.С.** К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин // Гос.изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. – М. –1960. – 132 с.
- [84] **Столыпина, Л. Н.** Свободные колебания ребристых пологих оболочек и выпуклых многогранников: дис...канд. техн. наук: 05.23.17 / Л. Н. Столыпина. – Алма-Ата., –1983. – 144 с.
- [85] **СП 52-117-2008.** Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Часть I. Методы расчета и конструирование. – М. –2008.
- [86] **СНиП52-01-2003.** Бетонные и железобетонные конструкции. – М. ГУП НИИЖБ, –2004. – 183с.
- [87] **СНиП II-7-81*.** Строительство в сейсмических районах. –М.: ФГУП ЦПП, – 2007. – 44 с.
- [88] **СНиП II-A.12-69*.** Строительство в сейсмических районах / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, –1977. – 28 с. +прил. 2.
- [89] Справочник проектировщика. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия / под ред. В.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, –1981. — 215 с.
- [90] **Треногин, В.А.** Методы математической физики / В.А. Треногин // Ин-т компьютерных исследований – М. –2002. –164с.
- [91] **Тухфатуллин, Б.А.** Численные методы расчета строительных конструкций. Метод конечных элементов (теория и практика) / Б.А. Тухфатуллин // [Текст] : учебное пособие. - Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2013. –100 с.
- [92] **Толоконников, Г.К.** Ассоциативная алгебра обобщенных функций, замкнутая относительно дифференцирования и взятия первообразной / Г.К. Толоконников, Ю. М. Широков // Теоретическая и математическая физика. – 1981. – том 46. – № 3. –с.305–309.
- [93] **Уздин, А.М.** Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А.М. Уздин, Т.А. Сандович // – СПб. –1993. – 89 с.

- [94] **Филиппов, А.П.** Колебания цилиндрических систем / А.П. Филиппов // Прикладная математика и механика. – Т.І. – 1937. – С. 77.
- [95] **Флюгге, В.** Статика и динамика оболочек / В. Флюгге // – М. – 1961. – 306 с.
- [96] **Хачатурян, Т.Т.** О динамическом расчете цилиндрических оболочек / Т.Т. Хачатурян // Изв. АН Армянской ССР. Т.ІІ. – № 5. – 1949.
- [97] **Халаби, С.М.** Численный расчет упругих тонких оболочек / С.М. Халаби, А.В. Макаров // – М.: РУДН, – 2008. – 131 с.
- [98] **Хлебной, Я.Ф.** К расчету оболочек, имеющих форму выпуклых многогранников / Я.Ф. Хлебной // Тонкостенные железобетонные конструкции. Сб. Госстройиздат. – М. – 1970. – С. 45.
- [99] **Хлебной, Я.Ф.** Пространственные железобетонные конструкции. Расчет, конструирование / Хлебной, Я.Ф. // Стройиздат. – М. – 1977. – 224 с.
- [100] **Хог Э.** Прикладное оптимальное проектирование: Механические системы и конструкции / Хог Э., Арора Я. // пер. с англ. Мир. – М.– 1983. – 478 с.
- [101] **Цейтлин, А.И.** Виброизоляция металлического каркаса здания филиала ГАБТ в Москве / Цейтлин А.И., Горпинченко В.М., Фруман В.Н., Барон Р.И., Пичугин А.А. // Сейсмостойк. Стр-во. Безопасность сооружений. – №4. – 2002.– С.31-34.
- [102] **Чануквадзе, Г.Ш.** Проект экспериментального 16-этажного каркасно-панельного жилого здания с фрикционными стенами-диафрагмами / Г.Ш. Чануквадзе, Л.М. Марджанишвили // Стр-во и архитектура. Сер.14 Сейсмостойк. Стр-во: Наук-техн реф. Вып. 5. – Сб. –1984.– С.1-4.
- [103] **Черепинский, Ю.Д.** К сейсмостойкости зданий на кинематических опорах / Ю.Д. Черепинский // Основания и фундаменты и механика грунтов. -1972. -№3. –С.13-15.
- [104] **Черняев, А. Ф.** Ряды Фурье. Интегралы, зависящие от параметра, и обобщенные функции / А. Ф.Черняев // – М.: МЗ Пресс, –2004. –149 с.

- [105] **Яблонский, А.А.** Курс теории колебаний Учеб / А.А. Яблонский, С.С. Норе́йко // Пособие для студентов втузов. Изд. 3-е, испр. И доп. Высш. школа. – М. – 1975. – 248 с.
- [106] **A. Love.** On the small free vibrations and deformation of thin elastic shell. Phil. Trans. Roy. Soc., vol: 179(A), –1888.
- [107] **A.Love.** A treatise on the mathematical theory of elasticity. Cambridge, –1927.
- [108] **Akhileshwar Singh.** Analysis of stiffened rectangular plate / Akhileshwar Singh // Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, India. – 2013. – 54p.
- [109] **Allan H.G.** Analysis and design of structure panels / H.G.Allan // Oxford, London. Pergamon Press, – 1969.
- [110] **Akkas N., Bauld N.R.,** Buckling and initial post – buckling behavior of clamped shallow spherical sandwich shells / N. Akkas, N.R.Bauld, Intern. J. Sol. Struct. 7, №9. - 1971. – P.1237-1259.
- [111] **CEN. EuroCode 8:** Final draft of EuroCode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Bruxelles: European Committee for Standardization. – 2003.
- [112] **Chopra, A. K.** Dynamic of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering / A. K. Chopra. – New Jersey. Prentice-Hall. – 2006. –794 p.
- [113] **Chopra, A. K.** Elastic Response Spectrum: a Historical Note / A. K. Chopra // Earthquake Engineering and Structural Dynamics 36, 2007, P.3–12.
- [114] **Cohn, M.Z.** Computer nonlinear analysis of reinforced concrete structures / M.Z. Cohn, F. Erbatur, P.D. Bhat // ACI Journal. – 1983. – Vol. 80. –No 1. – P. 28–32.
- [115] **Cohn, M.Z.** Nonlinear analysis system for concrete structure / M.Z. Cohn, W. Frzywiecki // Engineering Structures. – 1987. – Vol. 9. – No 2. – P.104–123.
- [116] **Chen, C.J.** Vibration analysis of stiffened plates / C.J. Chen, W. Liu, S.M. Chern // – 1994, – P.471–480.
- [117] **Chung Y.K.** Buckling of Sandwich plate by finite layer metod / Y.K. Chung, L.G.Tham, K.P.Chong // Comp. and Struch., №.15 –1982, 2, – P.131-134.

- [118] **Datta, T.K.** Seismic Analysis of Structures / T.K. Datta. – Singapore.: John Wiley (Asia), 2010. – 454 p.
- [119] **David B.** Behavior of shell structures / David B., Farnsworth JR // Massachusetts Institute of Technology. – 1999. – 58p.
- [120] **E.Reissner.** On vibrations of shallow spherical shells. J. Applied Physics, t. 17, N 12, 1946.
- [121] **Eduarl Ventsel.** Thin Plates and Shells Theory, Analysis, and Applications // Eduarl Ventsel, Theodor Krauthammer // Marcel Dekker, Inc. –New York. –2001. – 651p.
- [122] **Housner, G.M.** Behavior of structures during earthquakes / G.M. Housner // Journal of Engineering mechanical Division. – 1959. – Vol. 85. – № 4. – P.109–129.
- [123] **Hồng, L.N.** Lý thuyết tấm vỏ / L.N. Hồng // Nhà xuất bản xây dựng. Hà Nội. – 2006. –P.86.
- [124] **Kondratyeva, L. N.** Analytical method of determining folded depressed shells' free oscillation frequency / L. N. Kondratyeva, Y. L. Routman, A. M. Maslennikov, O.
- [125] **Resissner E.,** On transverse vibration of thin shallow elastic shells / E.Resissner // Quart. Appl. Math 13. – 1955, P.169-176.
- [126] **Koko, T. S.** Super finite elements for non-linear static and dynamic analysis of stiffened plate structures. Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, –1990.
- [127] **Mead D.J.** Free vibration of a thin cylindrical shell with discrete axial stiffeners / D.J. Mead, U N.S Bard // J. Sound and Vibr, –1986. –№2. P.229-250.
- [128] **Mukhopadhyay, M.** Geometric nonlinear analysis of stiffened plate by the spline finite strip method / M. Mukhopadhyay, A.H. Sheikh // Computer and structure. -2000. P.765-785.
- [129] **Mukherjee, A.** Finite element free vibration of eccentrically stiffened plates / A. Mukherjee, M. Mukhopadhyay // Computers and Structure. –1989. P.295-305.
- [130] **Riva, P.** Engineering approach to nonlinear analysis of concrete structures. Journal of Structural Engineering / P. Riva, M.Z. Cohn // ASCE (US). –1990. – Vol. 116. – No. 8. – P. 2162–2186.

- [131] **Soper, W.** Lager deflection of stiffened plates / W.Soper // Journal of Applied Mechanics. –1958. P.444-448.
- [132] **Vaughan .H.** Dynamic plastic buckling of sandwich shell / H.Vaughan, H.E. Lindberg // J.Appl. Mech. 35, №3. –1988. P.539-546
- [133] **Weingarten V.J.** Free vibration of thin cylindrical shell / V.J.Weingarten // AJAA Journ. –№4. –1964.

Веб-сайт: <http://www.cdc.biz.vn> <http://www.cdcjsc.com>



« » 2014 г.

CÔNG TY CỔ PHẦN TƯ VẤN ĐẦU TƯ VÀ THIẾT KẾ XÂY DỰNG VIỆT NAM

K/T TỔNG GIÁM ĐỐC
PHÓ TỔNG GIÁM ĐỐC
Tiến sĩ. NGUYỄN HỮU VIỆT