

На правах рукописи

Нгуен Хай Хоан

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

Специальность: **05.23.17** – Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» на кафедре строительной механики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кондратьева Лидия Никитовна

Официальные оппоненты: **Галилеев Сергей Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
экономический университет», кафедра «Произ-
водственный менеджмент и инновации», профессор;

Видюшенков Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора Алексан-
дра I», кафедра «Прочность материалов и конструк-
ций», г. Санкт-Петербург, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Государственный университет
морского и речного флота имени адмирала
С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 18 декабря 2014 г. В 11⁰⁰ часов на заседании диссертаци-
онного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государ-
ственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-
Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний (ауд. 219).

Тел./факс: 8 (812) 316-58-72; Email: rector@spbgasu.ru

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

Автореферат разослан « __ » октября 2014 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Карпов Владимир Васильевич

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы 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 пологой 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, А.С. Вольмира, В.А. Амбарцумяна, В.В. Болотина, А.Л. Гольденвейзера, Б.К. Михайлова, А.П. Филиппова, 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.

Задачи исследования:

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, геометрия которых показана на рис. 1.

Предмет исследования – методы расчета складчатых оболочек.

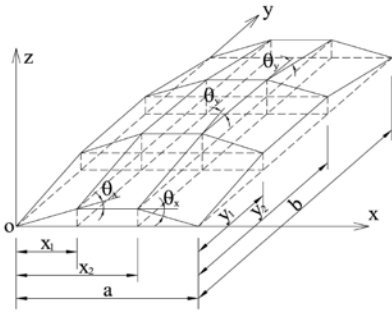


Рис. 1. Геометрия складчатой оболочки

Научная новизна исследования:

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 свободных колебаний 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 18x18 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».

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 и обсуждались на конференциях: «Новые требования обеспечения безопасности в строительстве» (СПбГАСУ, СПб., 30 – 31 октября 2012 г.), «Актуальные проблемы в расчетах строительных конструкций и сооружений» (СПбГАСУ, СПб., 6 февраля 2013 г.), «Актуальные проблемы современного строительства» (СПбГАСУ, СПб., 12 апреля 2013 г.); на международной конференции «Актуальные проблемы архитектуры и строительства», (СПбГАСУ, СПб., 25 – 28 июня 2013 г.), на XXV международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций», на XXV международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов.» (СПбГАСУ, СПб., 23–26 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 рецензируемых журналах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 111 страниц машинописного текста. Работа содержит 54 рисунка, 17 таблиц. Список использованной литературы из 133 наименований 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 четвертой главе приведены основные понятия расчета по акселерограммам. Разработан алгоритм определения характеристик УПВ при расчете полой 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.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработаны алгоритмы определения частот свободных колебаний тонкой полой гладкой и складчатой оболочки, отражающие особенности работы конструкции с непрерывными и разрывными параметрами.

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.

Алгоритм определения частот свободных колебаний пологих складчатых оболочек (рис. 2) разрабатываем на основе известных выражений для частоты свободных колебаний гладких пологих оболочек и аналитического метода определения частот свободных колебаний складчатых пологих оболочек, разработанного Л.Н. Кондратьевой.

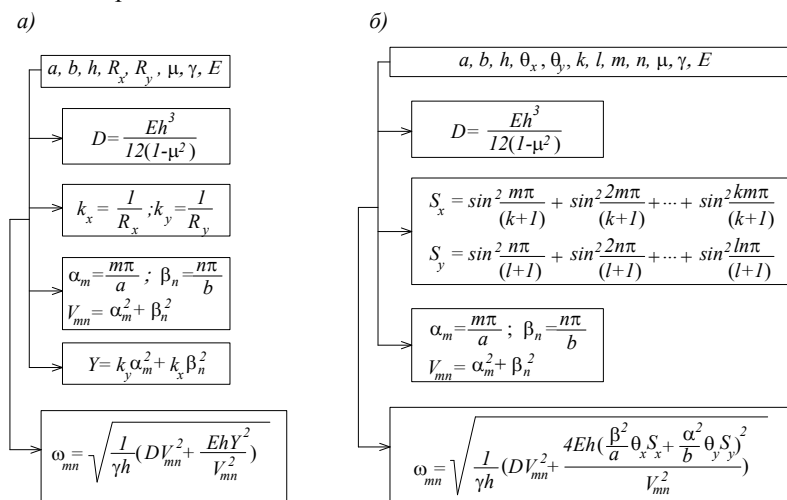


Рис. 2. Алгоритм определения частоты свободных колебаний полой оболочки: а) гладкая; б) складчатая

Здесь D – цилиндрическая жесткость оболочки; γ – плотность материала; h – толщина оболочки; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; m, n – число полуволн в направлениях осей x и y соответственно; a и b – размеры оболочки в плане; θ_x, θ_y – углы изломов срединной поверхности в направлениях

осей x и y соответственно; k, l – число изломов срединной поверхности в направлениях осей x и y соответственно.

2. Разработана математическая модель складчатой полой оболочки на квадратном плане.

Разработаны трехмерные модели оболочек (рис. 3).

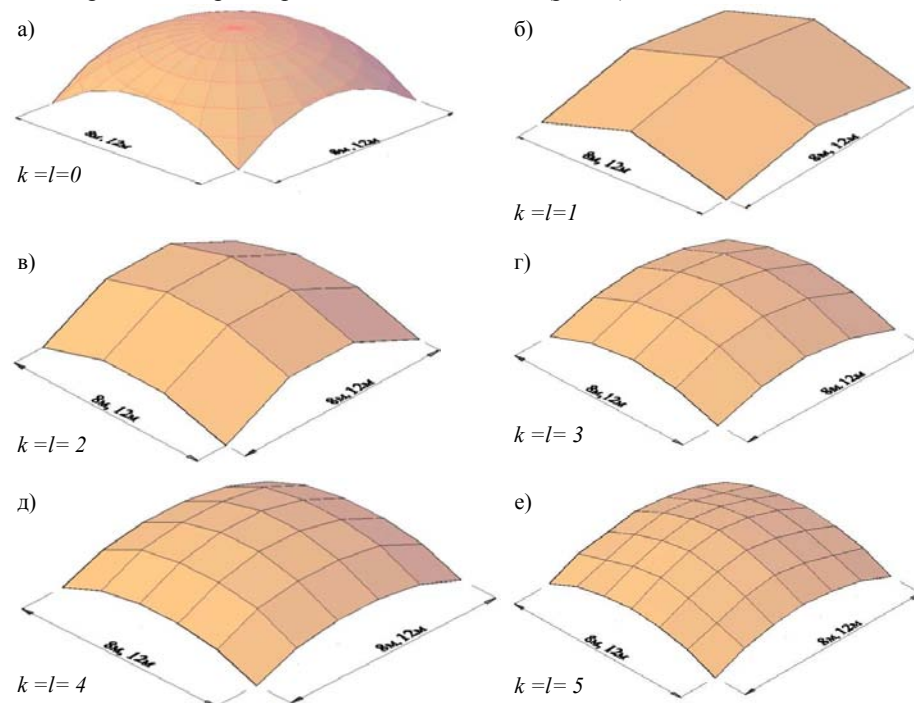


Рис. 3. Трехмерные модели квадратных в плане оболочек

В качестве объектов исследования рассмотрим квадратные в плане железобетонные шарнирно опертые тонкие пологие оболочки с размерами в плане 8х8м и 12х12м с симметричной раскладкой плоских плит и одинаковыми проекциями этих плит на горизонтальную плоскость 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 $E = 2.10^4 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$. Стрела подъема для оболочки 8х8м равна $f = 1,6\text{м}$ и для оболочки 12х12м $f_l = 2,4\text{м}$.

Используя алгоритм (см. рис. 2) и модели оболочек (см. рис. 3), получили зависимости частот свободных колебаний квадратных в плане гладких и складчатых оболочек от волновых чисел, количества изломов (рис. 6, а), толщин (рис. 4, б) и размеров оболочки в плане (рис. 4, в).

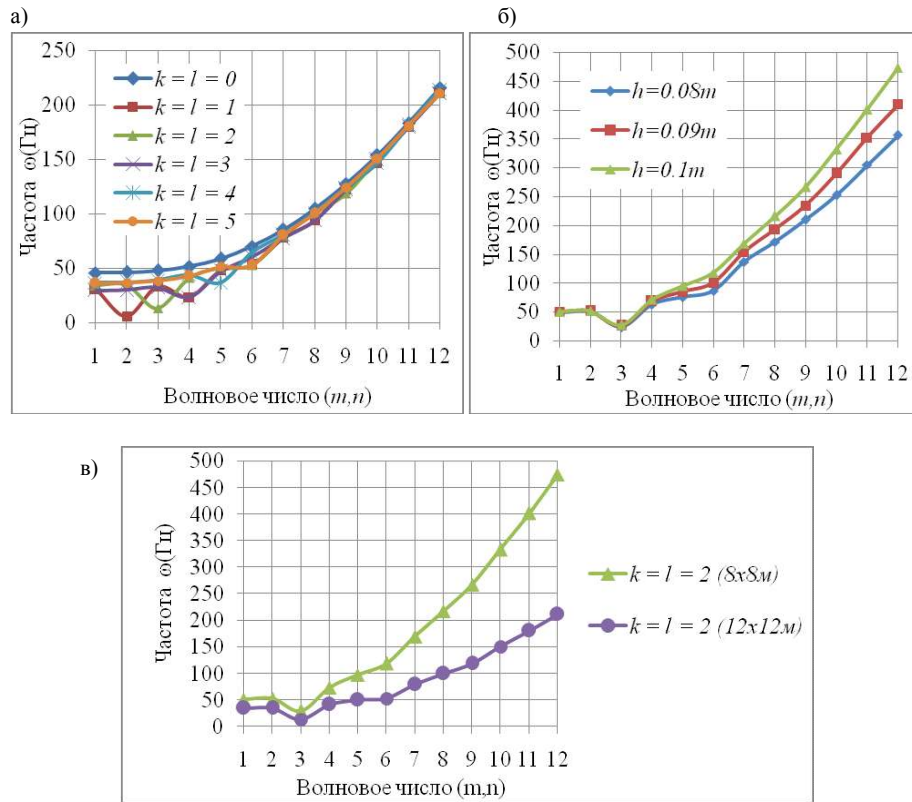


Рис. 4. Зависимости частот свободных колебаний квадратной в плане полой складчатой оболочки от:
а) числа изломов; б) толщины оболочки; в) размеров оболочки в плане

Анализируя графики (см. рис. 4), сделаны 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.

Для проверки возможности использования аналитического и численного методов, определим частоты свободных колебаний двумя методами. Сравнение результатов расчета приведено в табл. 1.

Минимальные частоты, полученные аналитическим методом ω_1 и разработанным методом ω_2

Количество изломов k, l	Оболочка 8x8м		Отклонение, %	Оболочка 12x12м		Отклонение, %
	ω_1 (Гц)	ω_2 (Гц)		ω_1 (Гц)	ω_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 методом, составляет 7.65%, что позволяет сделать вывод, что результаты согласуются удовлетворительно, поэтому можно говорить о достоверности разработанного метода.

3. Разработан метод определения места положения сдвиговой упругопластической вставки (УПВ) в складчатой оболочке, основанный на выявлении условий возникновения минимальных частот свободных колебаний и определения опасных сечений оболочки с максимальными сдвиговыми усилиями, возникающими при колебаниях.

Методы расчета высотных зданий с УПВ разработаны Ю.Л. Рутманом, В.И. Плетнёвым, А.А. Смирновым, К.Т. Нгуеном, О.В. Голых. 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 (рис. 5 и 6).

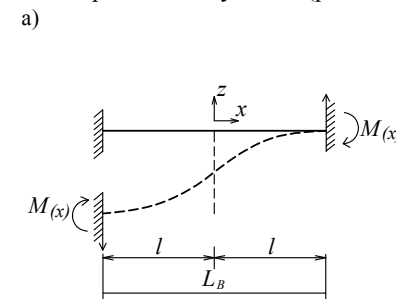


Рис. 5. Расчетная схема работы арматуры на сдвиг

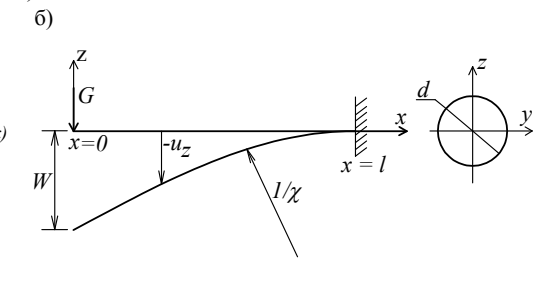


Рис. 6. Правая отсеченная часть расчетной схемы:
а) эквивалентная консоль; б) сечение арматуры

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, уравновешиваю-

щая 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.

Анализ графиков (рис. 7) показывает, что устанавливать сдвиговые УПВ следует в центральных сечениях по линиям изломов (рис. 8, 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.

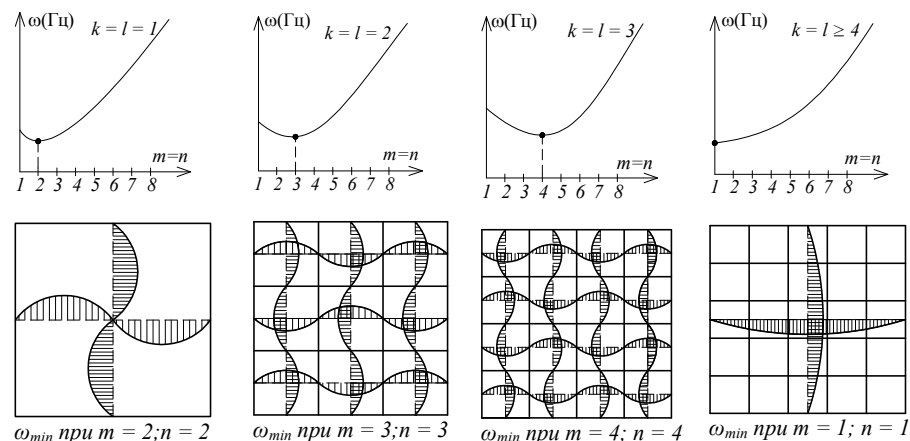


Рис. 7. Зависимости частот и форм свободных колебаний складчатой оболочки на квадратном плане при различных количествах изломов от волновых чисел

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. 8, б).

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. 8, б и г), 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. 8, а и в).

УПВ, расположенные по разработанным рекомендациям, понижают амплитуды колебаний в складчатых оболочках, возникающие при динамических воздействиях.

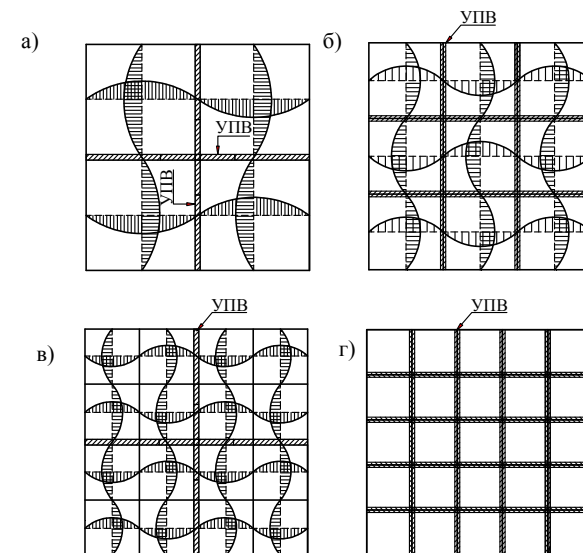


Рис. 8. Расположение УПВ в складчатых оболочках
а) $k = l = 1$; б) $k = l = 2$; в) $k = l = 3$; г) $k = l \geq 4$

4. Разработан алгоритм расчета характеристик сдвиговой УПВ пологой складчатой оболочки.

На основе научных разработок, предложенных Ю.Л.Рутманом для УПВ в высотных зданиях, построим алгоритм определения характеристик УПВ в складчатых оболочках (рис. 9).

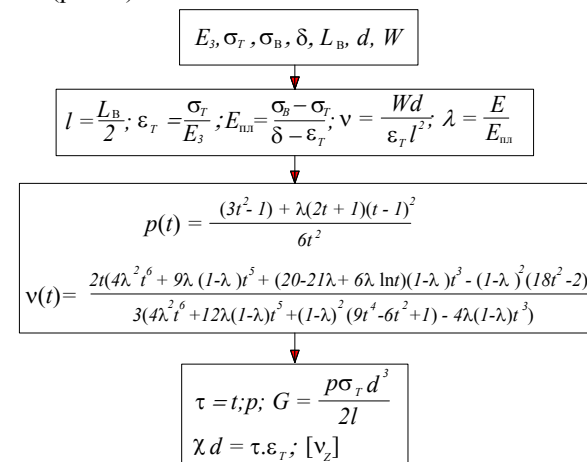


Рис. 9. Алгоритм определения характеристик УПВ

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

В случае упругопластической диаграммы с линейным упрочнением

$$\lambda = \frac{E_{\text{пл}}}{E} = \frac{1148}{2 \cdot 10^5} = 0.00724$$

$$\text{где } E_{\text{пл}} = \frac{\sigma_e - \sigma_T}{\delta - \varepsilon_T} = \frac{590 - 390}{0.14 - 0.00195} = 1148 \text{ МПа}; \varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E} = \frac{390}{2 \cdot 10^5} = 0.00195; v = \frac{Wd}{\varepsilon_T t^2};$$

извыражений

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

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

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

Определены и сведены в табл. 2 результаты расчета сдвиговой нагрузки арматурного стержня класса А-III (А400) диаметром 8мм, длиной 0,1м.

Таблица 2

Величины сдвиговой нагрузки G в зависимости от вертикальных перемещений W для одного стержня d = 8мм, L_в = 0,1м.

W, м	v	t	p	$\chi \frac{d}{2}, \%$	G для 1-го стержня (кН)	G для 1-пог.м вставки (кН)
0.001	0.410	0.2	0.068	0.08	0.068	2.72
0.005	2.051	1.4	0.316	0.54	0.212	8.48
0.01	4.103	5.9	0.500	2.31	0.365	14.60
0.015	6.154	13.8	0.521	5.37	0.472	18.88
0.020	8.205	19.1	0.520	7.45	0.512	20.48
0.025	10.265	23.4	0.541	9.14	0.540	21.60
0.030	12.308	27.2	0.548	10.61	0.562	22.48
0.035	14.359	30.8	0.568	12.02	0.581	23.24
0.040	16.410	34.1	0.580	13.31	0.601	24.04
0.045	18.462	37.2	0.589	14.54	0.615	24.60

По алгоритму (см. рис. 9) определены нагрузки стержня УПВ класса А-III (А400) L_в = 10 см и d = 8мм при различных вертикальных перемещениях конца стержня (рис. 10, а). На рис. 10, б показаны графики зависимости сдвиговых нагрузок от прогибов по результатам экспериментов В.И. Плетнёва.

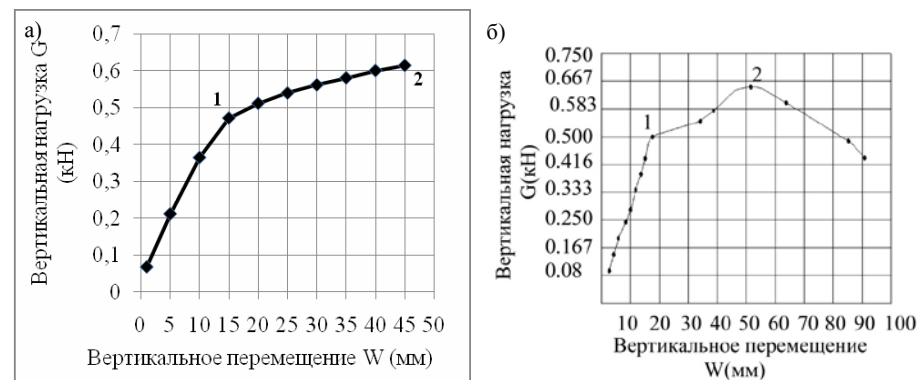


Рис. 10. Графики зависимости «нагрузка–перемещение» для 1-го арматурного стержня а) по алгоритму (рис.9); б) по результатам экспериментов В.И. Плетнёва

Точки 1 на рис.10. соответствуют 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}.

Получены новые численные результаты для критических сдвиговых G_{кр} и предельных G_{пр} нагрузок для одного погонного метра вставки различной ширины L_в с различным диаметром арматуры d. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 3

Критические и предельные вертикальные нагрузки для одного погонного метра УПВ

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

При циклических колебаниях накапливаются пластические деформации, поэтому расчет необходимо производить в нелинейной постановке. Для учета пластических деформаций предлагается описать зависимости «напряжения–относительные деформации» петлей гистерезиса согласно теории В.А. Ивовича (рис. 11). Чем больше площадь петли, тем больше рассеивание энергии в конструкции и тем быстрее затухают колебания. При таком подходе учитывается большее по-

глощение энергии динамического воздействия по сравнению с упругой постановкой задачи. Расчет выполнен в программе «SAP2000», с помощью опции «Нелинейный свойство материала».

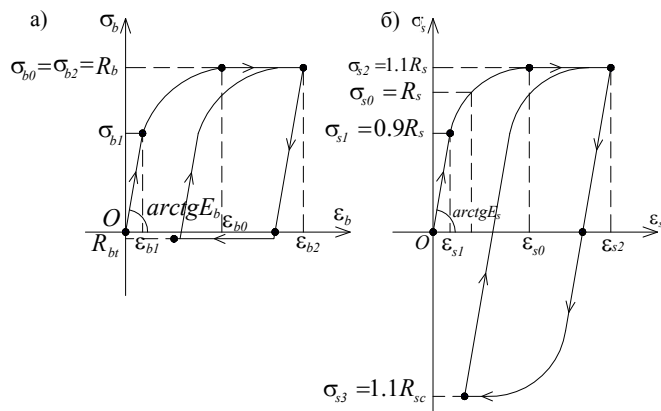


Рис. 11. Характеристика бетона и арматуры с гистерезисной петлей:
а) для бетона; б) для арматуры

Согласно графику (рис.11, а) вычисляем сжимающие напряжения бетона σ_b :

$$\text{при } 0 \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{b1} \quad \sigma_b = \epsilon_b \cdot E_b; \quad (3)$$

$$\text{при } \epsilon_{b1} < \epsilon_b < \epsilon_{b0} \quad \sigma_b = \left[\left(1 - \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \right) \frac{\epsilon_b - \epsilon_{b1}}{\epsilon_{b0} - \epsilon_{b1}} + \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right] R_b; \quad (4)$$

$$\text{при } \epsilon_{b0} < \epsilon_b < \epsilon_{b2} \quad \sigma_b = R_b; \quad (5)$$

$$\sigma_{b1} = 0.6R_b; \quad (6)$$

$$\epsilon_{b1} = \frac{\sigma_{b1}}{E_b} \quad (7)$$

где ϵ_b – относительные деформации бетона; E_b – значения начального модуля упругости бетона; R_b – расчетные значения сопротивления бетона осевому сжатию; R_{bt} – расчетные значения сопротивления бетона осевому растяжению.

Согласно диаграмме (рис.11, б) напряжения в арматуре σ_s определяем по формулам:

$$\text{при } 0 < \epsilon_s < \epsilon_{s1}: \quad \sigma_s = \epsilon_s \cdot E_s; \quad (8)$$

$$\text{при } \epsilon_{s1} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s2}: \quad \sigma_s = \left[\left(1 - \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right) \frac{\epsilon_s - \epsilon_{s1}}{\epsilon_{s0} - \epsilon_{s1}} + \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right] R_s \leq 1.1R_s. \quad (9)$$

Расчетные значения сопротивления арматуры растяжению R_s определяем по п.п.6.2.8 (СНиП52-01-2003). Модуль упругости арматуры: $E_s = 2,0 \cdot 10^5$ МПа;

деформация арматуры ϵ_{s0} определены по следующим формулам:

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

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

Разработан алгоритм расчета характеристик сдвиговой УПВ полой складчатой оболочки при сейсмических воздействиях (рис. 12).

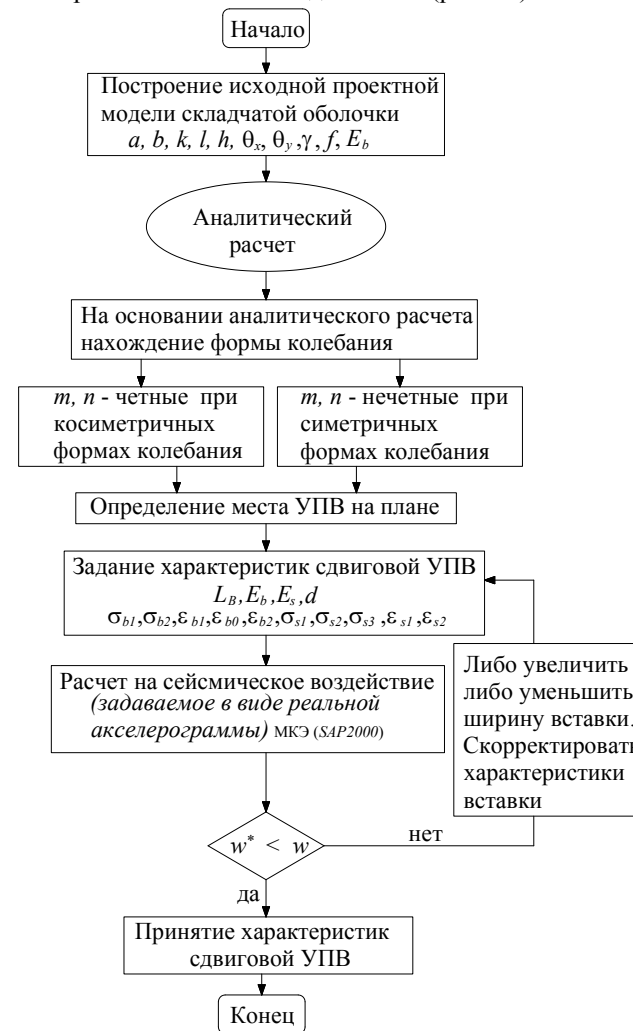


Рис. 12. Алгоритм расчета характеристик УПВ полой складчатой оболочки

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.

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

В качестве объектов исследования рассмотрим железобетонные оболочки 18×18 м, составленные из плоских элементов, с тремя изломами в двух направлениях $k = l = 3$. Согласно рис. 8, принимаем положение УПВ в центральных сечениях оболочки.

Для всех оболочек принимаем: бетон B25; модуль упругости $E_b = 30 \cdot 10^3$ МПа; удельный вес материала (железобетон) $\gamma = 2500$ кг/м³; коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$; толщину оболочки $h = 10$ см. Для вставки используем бетон B10, имеющий модуль упругости $19 \cdot 10^3$ МПа.

Алгоритм расчета складчатой оболочки с УПВ включает 4 шага:

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

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

1.2. Определить граничные условия.

1.3. Задать количество элементов и узлов.

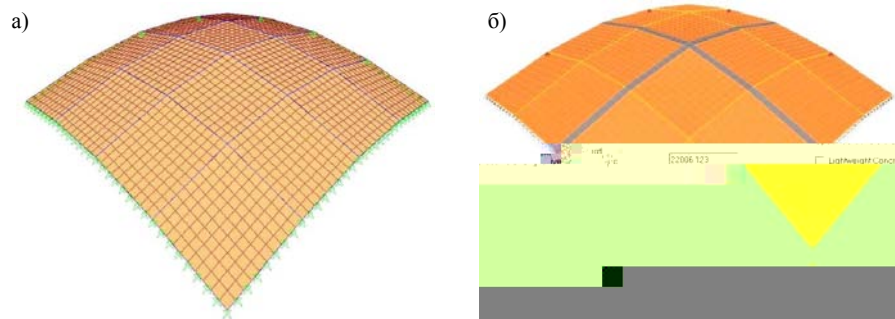


Рис. 13. Конечно-элементная модель полой складчатой оболочки 18×18 м
а) без УПВ; б) с УПВ шириной 0.4м

Шаг 2: Ввести жесткостные и геометрические характеристики.

2.1. Ввести жесткостные характеристики плоских элементов оболочки.

Диалоговое окно «Свойство материала» (рис. 14, а) позволяет задать жесткостные характеристики элементов оболочки. Для УПВ выбираем опцию «Нелинейное свойство материала» (рис. 14, б).

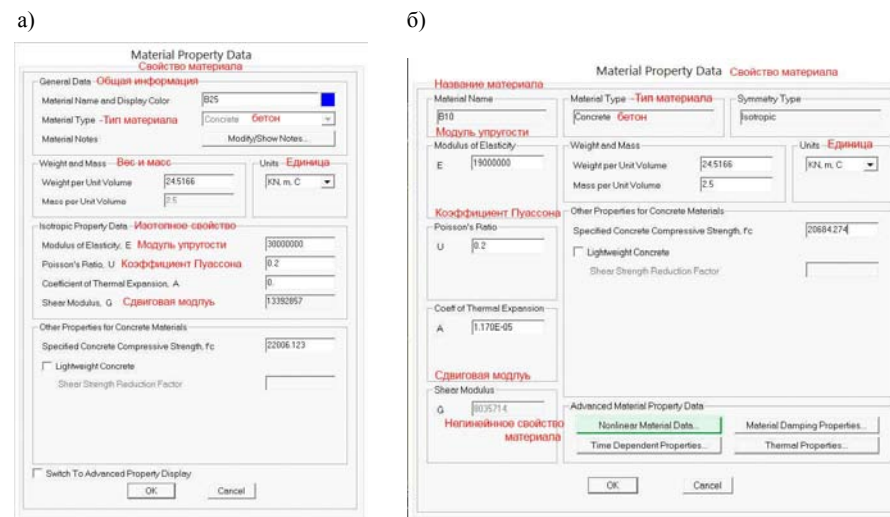


Рис. 14. Определение жесткостных характеристик
а) для плиты оболочки; б) для УПВ

2.2. Определение напряжений и деформаций УПВ в нелинейной постановке.

В диалоговом окне «Нелинейное свойство материала» показаны напряжения и деформации в УПВ (рис. 15).

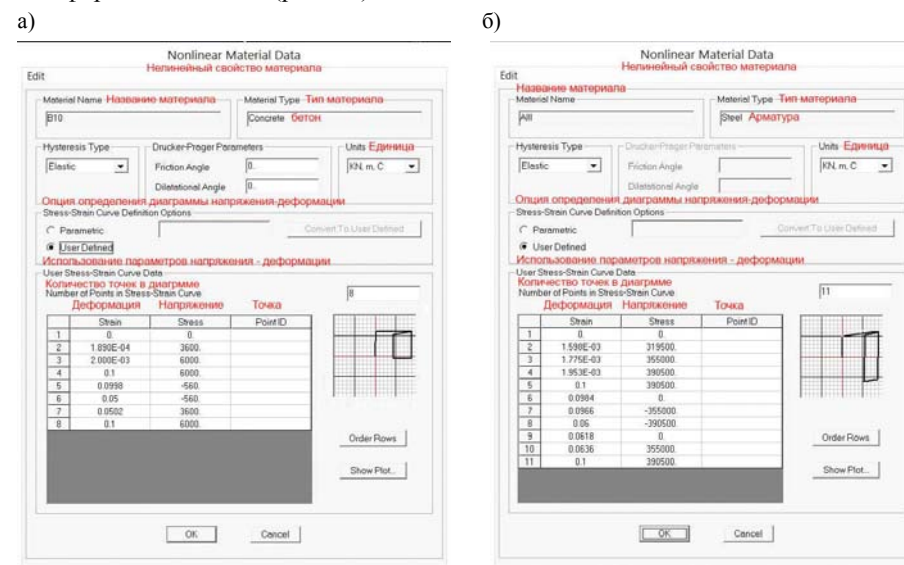


Рис. 15. Напряжения и деформации УПВ в нелинейной постановке
а) для бетона; б) для арматуры

2.3. Ввести геометрические характеристики оболочки.

Диалоговое окно «Параметры сечения оболочки» (рис. 16, 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. 16, б) позволяет определить класс бетона, арматуры и толщину УПВ. В данном окне можно определить количество, диаметр арматуры и расстояние между стержнями.

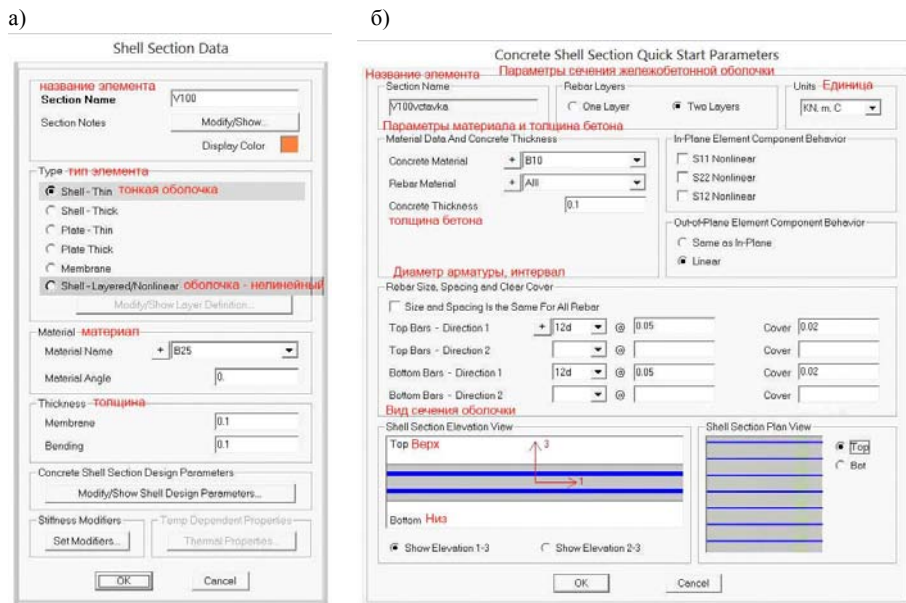


Рис. 16. Определение геометрических характеристик
а) для плиты оболочки; б) для УПВ

Шаг 3: Определить и ввести сейсмические нагрузки.

Сейсмическую нагрузку зададим акселерограммой типа Эль-Центро (рис. 17).

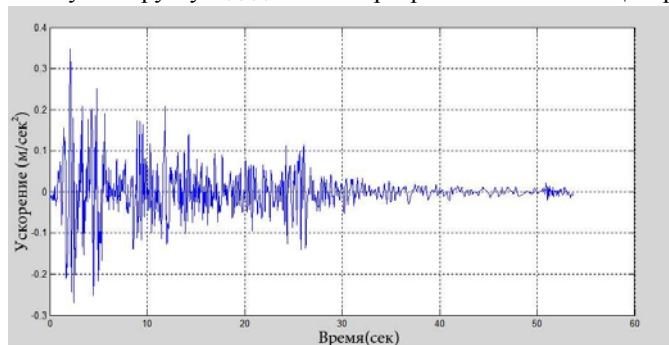


Рис. 17. Акселерограмма землетрясения Эль-Центро

Шаг 4. Анализ результатов расчета

Анализ результатов позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов.

6. Получены новые численные результаты, подтверждающие эффективность использования УПВ в складчатых оболочках при сейсмических воздействиях. Установлено, что напряжения в элементах складчатой пологой 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.

Максимальное вертикальное перемещение в центральном сечении складчатой оболочки 18х18м без УПВ и с УПВ шириной $L_B=0.4$ м (рис. 18) при сейсмическом воздействии равно 0,23м и 0,14м соответственно.

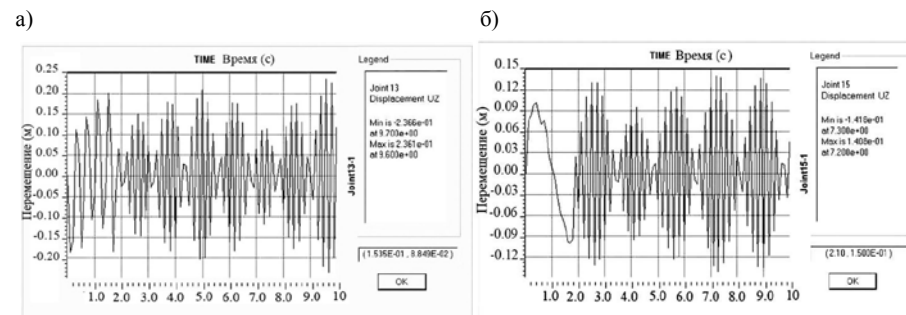


Рис. 18. Вертикальное перемещение в центральном сечении складчатой оболочки 18х18м:
а) без УПВ; б) с УПВ шириной 0.4м

Максимальное напряжение в плитах складчатой оболочки 18х18м без УПВ и с УПВ шириной 0.4м (рис. 19) равно 2132 кН/м² и 940 кН/м² соответственно.

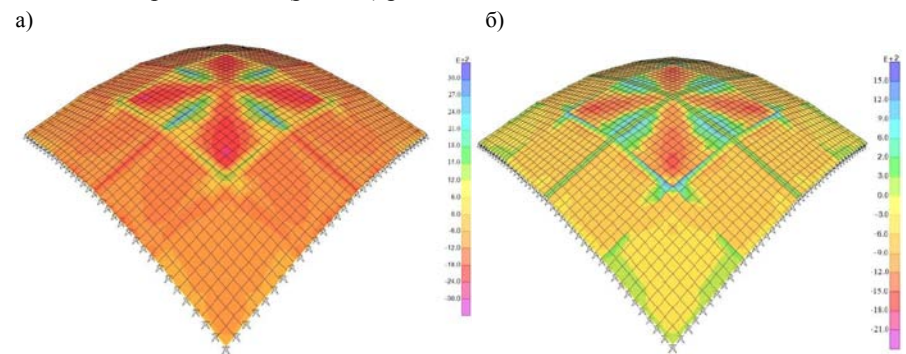
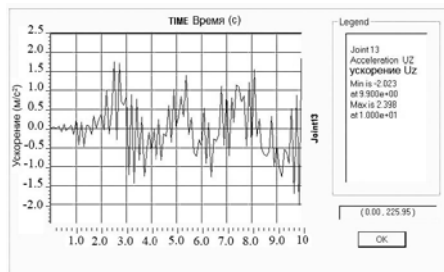


Рис. 19. Напряжения в элементах складчатой оболочки 18х18м:
а – без УПВ; б – с УПВ шириной 0.4м

Изменение ускорения в центральном сечении складчатой оболочки 18х18м без УПВ и с УПВ при сейсмической нагрузке показано на рис. 20.

а)



б)

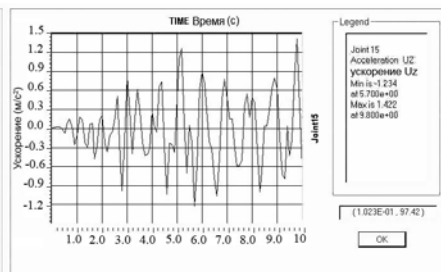


Рис. 20. Изменение ускорения в центральном сечении оболочки 18х18м:

а) без УПВ; б) с УПВ шириной 0.4м

В табл. 4 приведено сравнение результатов расчета ускорений центрального сечения складчатой оболочки без УПВ и с УПВ при сейсмическом воздействии.

Таблица 4

Ускорения в центральном сечении 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».

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

$$k_0 = \frac{w}{w^*}. \quad (10)$$

Для верификации разработанного метода рассчитаем оболочку по различным акселерограммам. В табл. 5 приведены результаты расчета вертикального перемещения, демпфирующего коэффициента и нормального напряжения складчатой оболочки 18х18м по различным акселерограммам.

Анализ результатов табл. 5 позволяет сделать вывод, что разработанный метод дает согласующиеся результаты, поэтому метод можно считать достоверным.

Таблица 5

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 (Laccnor)	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	Ньюхолл (Ньюхолл)	Min	-0.312	-0.134	2.32	-8.41	-4.60
		Max	0.304	0.132	2.30	51.9	22.87
5	Смоника (Смоника)	Min	-0.188	-0.130	1.44	-7.57	-3.44
		Max	0.186	-0.131	1.41	35.05	25.54

Общие выводы

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 инве-

стиционное 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.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Нгуен, Х.Х.** Частоты и формы свободных колебаний однородных оболочек, составленных из плоских элементов [Текст] / Х. Х. Нгуен // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №1(36). – С. 59-64 (0,81 п. л.).

2. **Нгуен, Х.Х.** Методика определения характеристик упругопластических вставок в складчатых оболочках [Текст] / Х.Х.Нгуен, Л.Н. Кондратьева // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. – №18. – С.59-65 (0,4/0,75 п. л.).

3. **Нгуен, Х.Х.** Определение частот свободных колебаний складчатых пологих оболочек на прямоугольном плане и сравнение аналитических и численных результатов [Текст] / Х. Х. Нгуен // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №1 (42). – С. 44-48 (0,62 п. л.).

4. **Нгуен, Х.Х.** Влияние упругопластических вставок на работу пологих складчатых оболочек при сейсмических нагрузках [Текст] / Х. Х. Нгуен // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №4(45). – С.53-57(0,67п. л.).

публикации в других изданиях:

5. **Нгуен, Х.Х.** Исследование влияния упругопластических вставок на свободное колебание складчатой оболочки [Текст] / Х.Х.Нгуен, Л.Н. Кондратьева // XXV международная конференция. Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов / СПбГАСУ. – СПб., 2013. – С.145-146. (0,13/0,06 п. л.).

6. **Нгуен, Х. Х.** Частоты свободных колебаний пологих складчатых оболочек с упругопластическими вставками (УПВ) [Текст] / Х.Х. Нгуен, О.В. Голых, Л.Н. Кондратьева // V международная конференция. Актуальные проблемы архитектуры и строительства. Част1 / СПбГАСУ. – СПб., 2013. – С.358-364. (0,4/0,3 п. л.).

7. **Нгуен, Х.Х.** Выбор упруго-пластической вставки для складчатых оболочек при свободных колебаниях [Текст] / Х.Х. Нгуен // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. Актуальные проблемы строительства / СПбГАСУ, – СПб., 2013. – С.154-156.(0,175 п. л.).

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 14.10.14. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 82.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 5.

