

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
ТАДЖИКИСТАН

Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими

УДК 624.042(575.3)

На правах рукописи



ДЖОНМАМАД Мохру Тохир

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ
ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности
05.23.00 - Строительство и архитектура
(05.23.17- Строительная механика)

Душанбе – 2025

Диссертация выполнена на кафедре «Промышленное и гражданское строительство» Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими и в лаборатории «Сейсмостойкость зданий и сооружений» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ.

Научные руководители: **Низомов Джахонгир Низомович**, доктор технических наук, профессор член-корр. НАНТ, зав. лаборатории «Сейсмостойкость зданий и сооружений» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ.

Каландарбеков Имомёрбек, заслуженный работник Таджикистана, доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими

**Официальные
оппоненты:**

Абдусаттаров Абдусамат, доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика» Ташкентского государственного транспортного университета, Республика Узбекистан

Исмоилзода Лутфулло Сулаймони, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела экспертизы проектов дорог, мостов и транспортных тоннелей, ГУП «Ташхисгар» Управление государственной экспертизы

Ведущая организация Джизакский политехнический институт, Республика Узбекистан

Защита диссертации состоится « 30 » декабря 2025 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 6D.KOA-027 при Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10^А. E-mail: dis.sia@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, www.ttu.tj

Автореферат разослан « » 2025г.

Учёный секретарь
диссертационного
совета, доктор PhD



Шокиров Р.М.

Введение

Актуальность темы. Оболочки широко используются в различных отраслях: строительство, машиностроение, авиастроение, судостроение и т.д. Это объясняется высокой несущей способностью тонкостенных конструкций, рациональностью и экономичностью. Оболочка называется полой, если её стрела подъёма меньше или равна одной пятой наименьшего линейного размера в плане.

В теории пологих оболочек, также, как и в общей теории пластин и оболочек, особое место занимает проблема, связанная с решением динамических задач.

Теоретические исследования динамической теории оболочек можно разделить на два направления: 1) работы, выполненные как на основе аналитических, так и численных методов, посвящённые исследованию собственных колебаний; 2) работы связанные с вопросами определения динамических перемещений и напряжений в зависимости от времени. Решение задач второго направления включает в себя, как правило, и задачи о собственных колебаниях и имеет ряд дополнительных трудностей, связанных при численной реализации с проблемами сходимости и точности решения.

В условиях широкого применения оболочек в качестве покрытий зданий и сооружений в сейсмически активных регионах, задача их динамического расчёта на специальные воздействия приобретает особую актуальность. Динамический анализ оболочек относится к числу ключевых и наиболее сложных проблем в строительной механике. Зачастую подобный расчёт сводится к нахождению частот и форм собственных колебаний. Учитывая, что оболочки покрытий, как правило, включают в себя контурные элементы, особую значимость имеет исследование динамического поведения конструкции на основе совместного решения уравнений движения оболочки и элементов контура. Комплексное изучение динамики системы позволяет не только определить частоты и формы колебаний, но и установить закономерности изменения перемещений и внутренних усилий во времени.

Поддерживающие оболочку конструкции также испытывают динамическое воздействие. Поэтому является актуальным вопрос о динамическом поведении всей пространственной системы «поддерживающие конструкции – контурные элементы – собственно оболочка».

Степень научной проработанности темы исследования. Главным требованием к методам расчёта является уменьшение трудоёмкости расчётов при сохранении достаточной точности полученного решения. Огромный вклад в исследование тонкостенных пространственных покрытий в частности развитии общей теории оболочек внесли: В.З. Власов, А.С. Вольмир, А.А. Гольденвейзер, Н.А. Кильчевский, А.И. Лурье, Х.М. Муштари, В.В. Новожилов, Ю.Н. Рабинов, А. Р. Ржаницын, В.И. Федосьев, А. Лава, С.П. Тимошенко, В. Флюгер, В.В. Болотин, Э.И. Григорлюк, В.Е. Береславский, О.В. Лужин, П. М. Огибалов, О. Д. Ониашвили и др.

Связь исследования с программами и научными темами. Данное исследование разработано в рамках тематики научно-исследовательской работы кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими и лаборатории «Сейсмостойкость зданий и сооружений» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ. Настоящая диссертационная работа непосредственным образом связана со «Стратегия развития строительной отрасли Республики Таджикистан на период до 2030 года», утверждённый Правительством Республики Таджикистан от 27 апреля 2022 года за №203.

Общая характеристика исследования

Целью диссертационной работы является численное моделирование динамических задач теории пологих оболочек, а также разработка соответствующих алгоритмов и компьютерных программ.

Задачи исследования.

- разработать методику расчёта полой оболочки с различными граничными условиями на импульсное воздействие методом конечных разностей;
- установить границы изменения шага по времени в зависимости от шага по пространственным координатам;
- изучить влияние сгущения сетки на результаты динамического расчёта с целью выбора оптимальной разностной сетки;
- разработать алгоритм расчёта оболочки с учётом продольных, поперечных, крутильных и изгибно - продольных и изгибно - крутильных колебаний контурных элементов;
- исследовать динамическое поведение оболочки с поддерживающими конструкциями при вращательно - поступательном движении диска оболочки.

Объектом исследования являются пологие оболочки как элементы конструкции, подверженные динамическим воздействиям, описываемые с использованием моделей механике сплошной среды.

Предметом исследования являются численные методы и алгоритмы моделирования динамических процессов в полых оболочках.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- по разработанной методике на примере полой оболочки показано применение метода конечных разностей для решения моментных динамических уравнений, исследованы границы изменения шага по времени и влияние сгущения сетки на результаты численного расчёта;
- разработана методика и решена задача о динамическом поведении оболочки с учётом продольных, поперечных из плоскости, поперечных в плоскости и крутильных колебаний контурного ребра;
- решена задача о колебании оболочки с учётом пространственной работы контурного ребра;

– решена задача о колебании оболочки с учётом инерции поддерживающих конструкций (в случае симметричного воздействия на опорной части системы «оболочка-поддерживающая конструкция»;

– получены уравнения и разработан алгоритм расчёта поступательно-вращательного диска оболочки.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработанные методика и компьютерные программы расчёта позволяют исследовать динамическое поведение оболочки совместно с контурными элементами и поддерживающими конструкциями на действие импульсной нагрузки. Это позволяет предложить проектировщикам практический инструмент для расчёта системы "колонна-диафрагма-оболочка" на сейсмические, аварийные, взрывные и другие виды динамических воздействий.

На защиту выносятся:

– методика расчёта полой оболочкой на импульсивные воздействия с различными граничными условиями;

– полученные пределы изменения шага по времени в зависимости от шага по пространственным координатам, а также влияние сгущения сетки на результаты динамического расчёта;

– результаты расчёта оболочки с учётом продольных, поперечных, крутильных, изгибно-продольных, изгибно-крутильных колебаний контурного ребра;

– методика и результаты расчёта оболочки с учётом работы поддерживающих конструкций;

– разработанные алгоритмы и программы расчёта на языке ФОРТРАН.

Степень достоверности, результатов подтверждается проведением численных экспериментов и сравнением полученных результатов с известными решениями.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.23.17 «Строительная механика», включая разделы по общим принципам расчёта сооружений и численным методам их расчёта, соответствующие пунктам:

1- Общие принципы расчёта сооружений и их элементов;

4- Численные методы расчёта сооружений и их элементов.

Личный вклад соискателя ученой степени в исследование заключается в проведении численных экспериментов по расчёту полой оболочек, а также в обработке, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов и подготовке материала для научных публикаций.

Апробация и реализация работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на: международной научно-теоретической конференции «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горных условий: проблемы, новые подходы и актуальные исследования», посвящённой 30 - летию XVI - й сессии Верховного совета Республики Таджикистан и 30 - летию Хорогского государственного

университета им. М. Назаршоева. Хорог, ХоГУ им. М.Назаршоева, 11-12 ноября 2022 г.; республиканской научно - практической конференции (с международным участием) «Вклад женщин в развитие архитектуры и строительство Таджикистана» посвящённой 20 летию изучения и развития естественных, точных и математических дисциплин в области науки и образования (2020-2040г.) Душанбе, Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, 28 ноября 2023 г.; республиканской научно - практической конференции «Архитектура и градостроительство». Часть1. Душанбе, Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, 26 марта 2024 г.; III-й международной научно-теоретической конференции «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горного региона: проблемы, новые тенденции и соответствующие исследования» ХоГУ им. М Назаршоева, Хорог, 14-15 июня 2024.

Разработанная методика внедрена в практику проектирования института «Душанбешахрсоз». Теоретические и прикладные аспекты работы уже интегрированы в учебный процесс Хорогского государственного университета им. М.Назаршоева для специальностей 1700401-01 «Гидротехнического строительство» (акты внедрения приводятся в приложении диссертации).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 9 работ, в том числе 5 из которых опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан и 4 статей в сборниках и журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы из 211 наименований, в том числе 12 на иностранном языке и приложений. Общий объём работы 149 страницы (без приложений) включая 43 рисунки и 10 таблиц.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, излагаются цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов и личный вклад соискателя.

В первой главе «Обзор исследований по расчёту оболочек на динамические воздействия» приведён обзор литературы по методу решения динамической задачи теории оболочек. Изложен анализ методы исследования колебаний оболочек при сейсмических воздействиях, учёт влияния поддерживающих конструкций на колебания оболочек, а также численные методы расчёта. Глава состоит из четырёх параграфов и заканчивается выводами.

Вторая глава «Расчёт пологой оболочки на импульсивное воздействие методом конечных разностей» посвящена моделированию динамических задач оболочки и состоит из 6 параграфов. Глава заканчивается выводами.

2.1. Основные уравнения и зависимости. Рассмотрена пологая оболочка положительной гауссовой кривизной (рис.1), для которой, согласно технической теории, волновые уравнения представляются в виде

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - (k_x + \mu k_y) \frac{\partial w}{\partial x} - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \\
& \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - (k_y + \mu k_x) \frac{\partial w}{\partial y} - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \\
& \frac{h^2}{12} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - (k_x + \mu k_y) \frac{\partial u}{\partial x} - (\mu k_x + k_y) \frac{\partial v}{\partial y} + \\
& + (k_x^2 + k_y^2 + 2k_x k_y) w - \frac{1-\mu^2}{Eh} q + \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0,
\end{aligned} \tag{1}$$

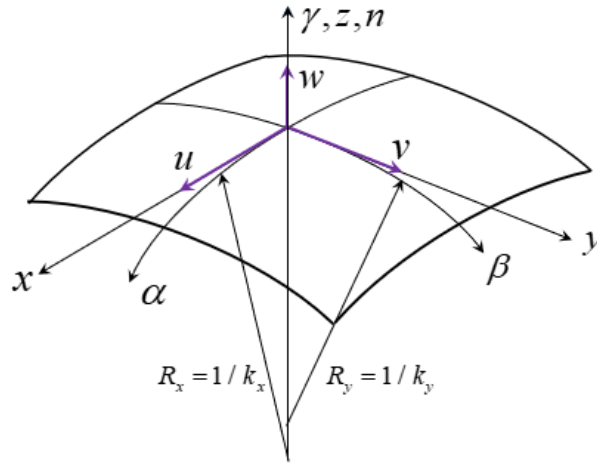


Рисунок 1. Геометрия полой оболочки

2.2. Численное моделирование. Преимуществом метода конечных разностей является то, что он позволяет решить задачу практически с любыми граничными условиями и геометрией оболочки. Применение метода конечных разностей к динамической задаче сводится к тому, что шаг за шагом во времени и на каждом шаге последовательно определяется напряженное и деформированное состояние оболочки с учетом изменения параметров системы, полученных на предыдущих шагах.

Разностные уравнения, аппроксимирующие дифференциальные уравнения в частных производных, можно получить на основе явных и неявных схем. Явная разностная схема даёт возможность рассчитать значения искомой функции на следующем слое непосредственно по известным значениям с предыдущих слоёв. В отличие от неё, неявная схема данным удобным свойством не обладает. Разностное уравнение, составленное для фиксированных узлов m и n невозможно разрешить относительно сеточной функции u_m^{n+1} , выразив её значение через уже вычисленные величины с предыдущего слоя. Это связано с тем, что в уравнение, помимо единственного неизвестного u_m^{n+1} , входят также соседние неизвестные значения u_{m-1}^{n+1} и u_{m+1}^{n+1} .

Следовательно, на каждом шаге необходимо решать систему линейных алгебраических уравнений.

Преимуществом этой схемы является то, что она обладает слабым условием устойчивости. Неявная схема, как показано в задачах о переходных процессах является экономически невыгодной, так как реализация ее на каждом шаге

требует в 4-5 раз больше времени, но она позволяет значительно увеличить шаг по времени. Однако, это касается лишь динамических задач с достаточно медленным процессом нагружения, при котором не возникает явно выраженных фронтов волн. В задачах о переходных процессах, вызванных резко изменяющимися нагрузками, ограничения, налагаемые на шаг по времени, требования точности, не позволяют сделать этого и, следовательно, для них явная схема является наиболее целесообразной.

Таким образом, ниже для аппроксимации дифференциальных уравнений используем явную разностную схему. Введём в области

$$0 \leq x \leq a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad t \geq 0$$

равномерную сетку (рис.2), образованную точками пересечения плоскостей.

$$x_i = ih_x, \quad y_j = jh_y, \quad t_n = n\tau, \quad (i, j, n = 0, 1, 2, \dots),$$

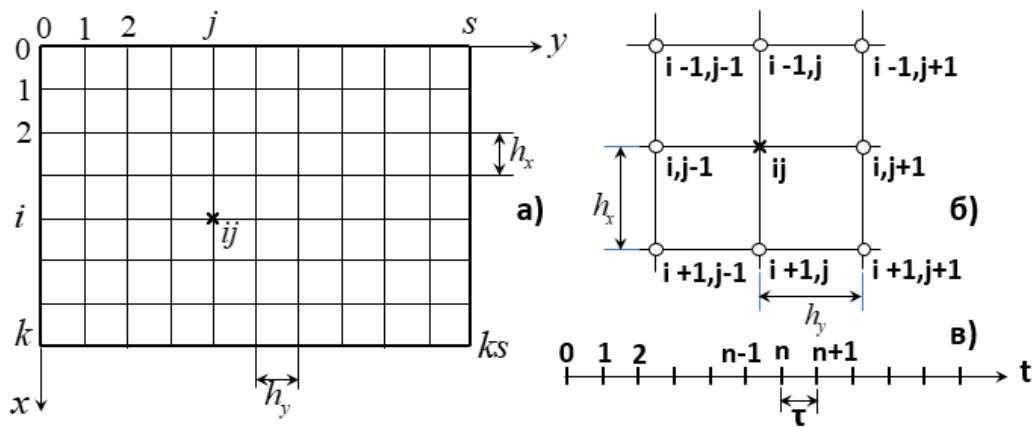


Рисунок 2. Разностная сетка

Для функции $f_{ij}^n = f(x_i, y_j, t_n)$ используя центральные разности, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= \frac{1}{h_x^2} (f_{i+1,j}^n - 2f_{ij}^n + f_{i-1,j}^n) + O(h^2); \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} &= \frac{1}{4h_x h_y} (f_{i+1,j+1}^n + f_{i-1,j-1}^n - f_{i-1,j+1}^n - f_{i+1,j-1}^n) + O(h^2); \\ \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{1}{2h_x} (f_{i+1,j}^n - f_{i-1,j}^n) + O(h^2); \\ \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} &= \frac{1}{h_x^4} (f_{i+2,j}^n - 4f_{i+1,j}^n + 6f_{ij}^n - 4f_{i-1,j}^n + f_{i-2,j}^n) + O(h^2); \\ \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} &= \frac{1}{\tau^2} (f_{ij}^{n+1} - 2f_{ij}^n + f_{ij}^{n-1}) + O(\tau^2) \end{aligned} \tag{2}$$

Аппроксимация производных в (2) имеет второй порядок точности по отношению к шагу.

2.3. Граничные и начальные условия. В этом параграфе рассмотрены некоторые виды граничных условий.

2.4. Анализ устойчивости решения и выбор шага по времени.

Численный алгоритм, полученный на основе дискретизация исходной задачи, должен соответствовать требованиям, связанным с устойчивостью, сходимостью и точностью решений. Одним из важных вопросов решения разностных уравнений по явной схеме, является обеспечение устойчивости.

2.5. Примеры анализа устойчивости решения численного моделирования. На основе изложенного алгоритма была разработана компьютерная программа, с помощью которой получены результаты колебаний полой оболочки от действия кратковременной нагрузки и мгновенного импульса.

Таблица 1. - Исследование устойчивости разностных уравнений

Прогиб и усилия	Значения шага по времени τ						
	$T_{11} / 200$	$T_{11} / 400$	$T_{11} / 600$	$T_{11} / 800$	$T_{11} / 1000$	$T_{11} / 1200$	$T_{11} / 1400$
w , мм	5,124	4,613	4,441	4,358	4,307	4,271	4,249
N_x , т/м	10,160	9,250	8,887	8,774	8,682	8,568	8,563
M_x , тм/м	-0,586	-0,527	-0,507	-0,498	-0,493	-0,488	-0,486

Из сравнения результатов, полученных при различных значениях шаг по времени и постоянном шаге по пространственным координатам, следует:

1. При уменьшении шага по времени обеспечивается устойчивое решение разностных уравнений по явной схеме.
2. Наблюдается сходимость результатов.

На рис. 3 представлены графики изменения прогиба

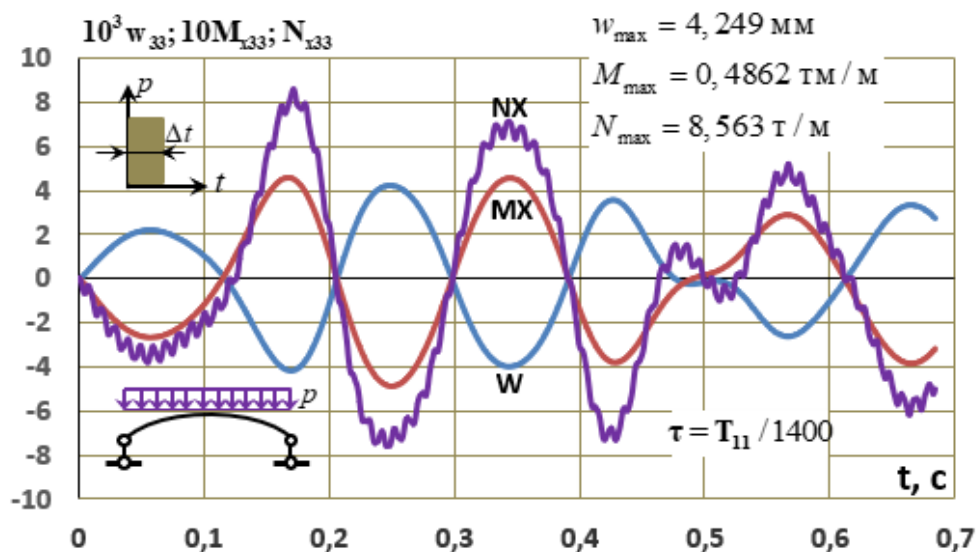


Рисунок 3. Изменение прогиба, изгибающего момента и нормальной силы в центре оболочки во времени

На рис. 4. представлены графики изменения прогиба в центре оболочки, получения при семи различных значениях шага по времени.

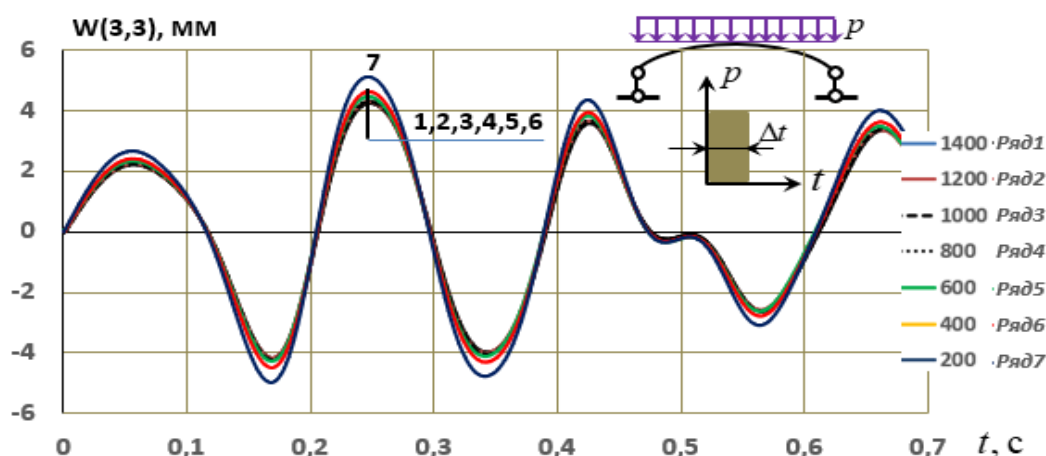


Рисунок 4. Изменение прогиба в центре оболочки с контуром в виде идеальной диафрагмы, при различных шагах по времени

На рис. 5 приведены зависимости изменения горизонтального перемещения и нормального усилия в середине контурного элемента.

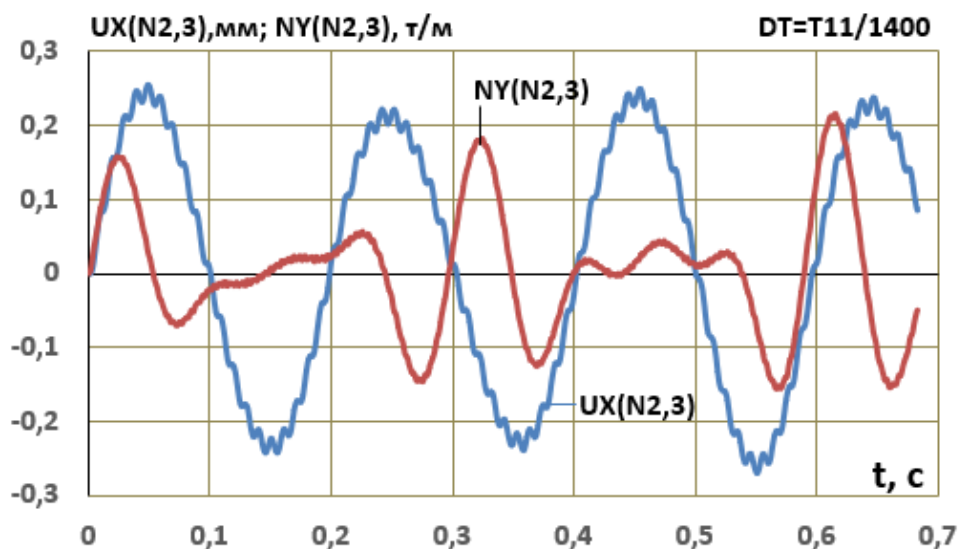


Рисунок 5. Горизонтальное перемещение и нормальная сила

2.6. Результаты динамического расчета оболочки с различными граничными условиями. Здесь получены результаты численного моделирования для оболочки с шарнирно неподвижным опиранием от действия равномерно распределённой кратковременной нагрузки интенсивностью $q = 0,5$ т/м² и продолжительностью действия $\Delta t = 0,00217$ с. На основе разработанного алгоритма была составлена компьютерная программа и получены результаты при различных разбиениях по пространственным координатам и времени. Здесь, также были исследованы устойчивость и сходимость решений разностных

уравнений. В табл. 2 приведены результаты численного моделирования на сетке 10×10 при различных шагах по времени. Видно, что с уменьшением шага по времени, т.е. с увеличением числа разбиений NT, уменьшаются погрешности и стремятся к нулю.

Таблица 2. - Максимальные значения прогиба, изгибающего момента и нормальной силы в центре оболочки от действия кратковременной нагрузки

NT	$10^3 w$, м	погрешность, %	$10^2 M_x$, тм/м	погрешность, %	N_x , т/м	погрешность, %
200	3,626	-	15,52	-	10,77	-
400	3,264	11,09	13,96	11,17	9,703	10,99
600	3,143	3,85	13,44	3,86	9,346	3,82
800	3,083	1,95	13,19	1,89	9,165	1,97
1000	3,046	1,21	13,04	1,15	9,06	1,16
1200	3,022	0,79	12,93	0,85	8,98	0,89
1400	3,006	0,53	12,86	0,54	8,936	0,49

Графики изменения прогиба, изгибающего момента и нормальной силы в центре оболочки, приведены на рис.6

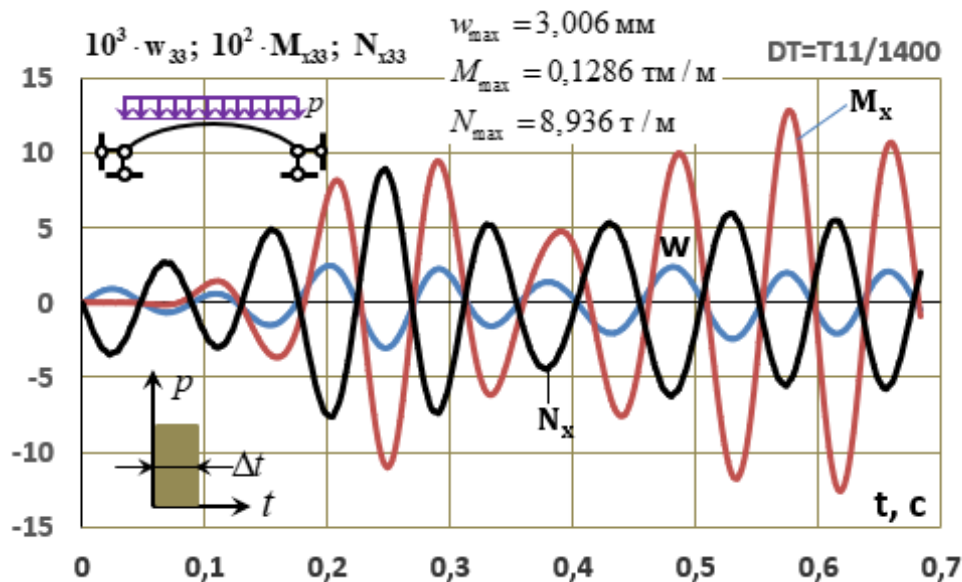


Рисунок 6. Прогиб и внутренние усилия в центре оболочки

Период собственных колебаний оболочки с жёстким защемлением контура имеет меньшие значения относительно случая шарнирного опирания, при этом амплитуды колебаний для обоих типов граничных условий являются сопоставимыми. На рис.7 представлен результат расчета оболочки с шарнирно неподвижным опиранием.

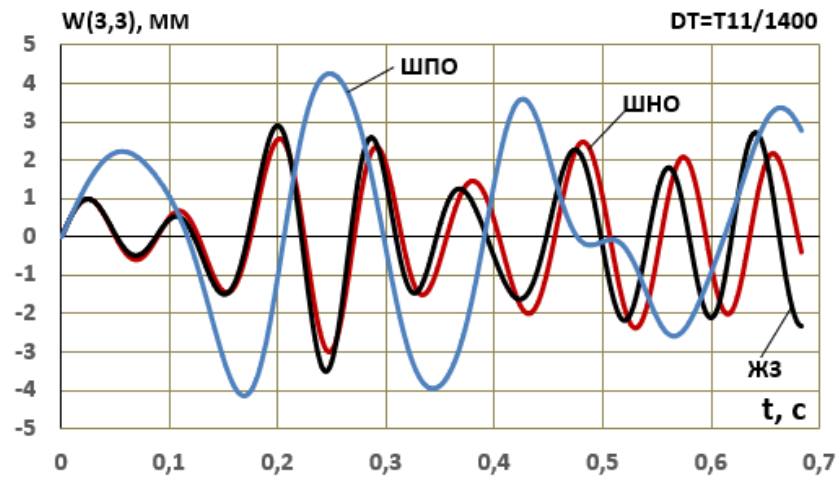


Рисунок 7. Сравнение результатов

На рис. 8 и 9 показаны график изменения прогиба в центре оболочки соответственно с ШНО и ШПО. Сравнение показывает, что колебательные процессы отличаются как по амплитудным, так и по частотным характеристикам.

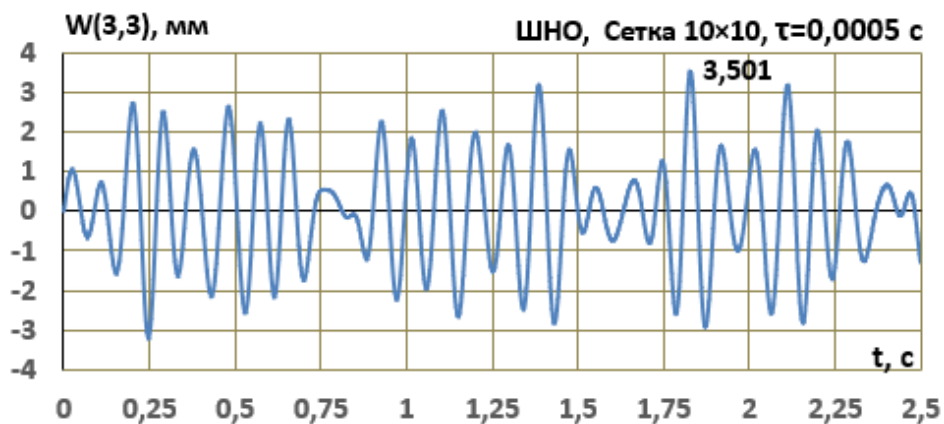


Рисунок 8. Колебания центра оболочки при ШНО

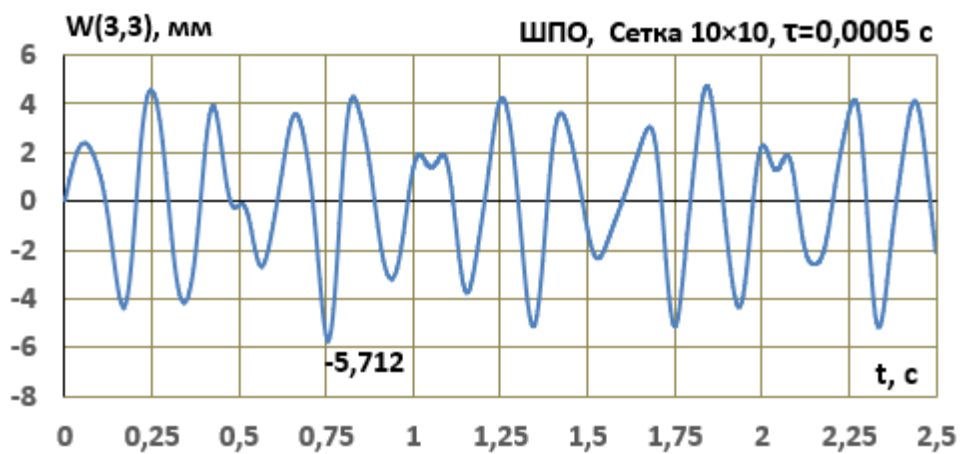


Рисунок 9. Колебания центра оболочки при ШПО

В третьей главе «Расчёт оболочки совместно с контурными элементами при импульсивном воздействии» рассматривается влияние деформативности контурных элементов на напряженно - деформированное состояние пологой оболочки. Глава состоит из 5 параграфов и заканчивается выводами.

3.1. Динамические уравнения контурного элемента. Расчет оболочки с учетом деформации контурного элемента представляет собой одну из сложных задач строительной механики. Динамические уравнения равновесия можно получить из непосредственного рассмотрения элемента контурного ребра (рис.10). Условия равновесия элемента позволяют получить дифференциальные зависимости между внешними нагрузками, передаваемыми с оболочки, и внутренними усилиями в поперечных сечениях контурной балки.

Проектируя силы на соответствующие оси координат и составив сумму моментов относительно оси (рис.10, б), получим

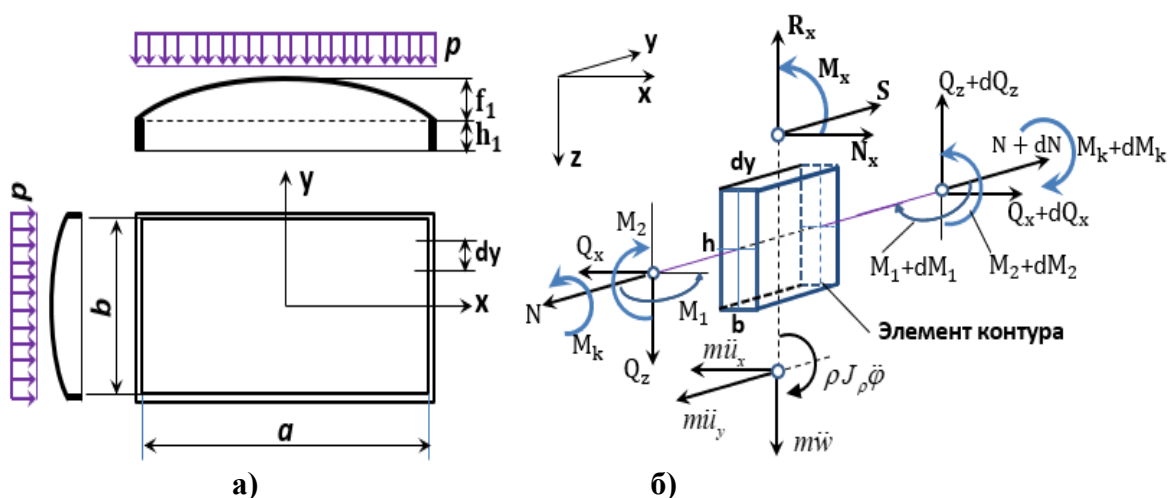


Рисунок 10. К уравнениям движения контурной балки: а-пологая оболочка; б-силы, действующие на элемент контура

$$\begin{aligned}
 \sum y = 0; \quad & \frac{\partial N}{\partial y} + S - \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0; \\
 \sum x = 0; \quad & \frac{\partial Q_x}{\partial y} + N_x - \bar{m} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0; \\
 \sum z = 0; \quad & \frac{\partial Q_z}{\partial y} - R_x - \bar{m} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0; \\
 \sum m_y = 0; \quad & \frac{\partial M_k}{\partial y} - M_x - \rho J_p \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0;
 \end{aligned} \tag{3}$$

здесь N, Q_x, Q_z, M_k – силы и крутящий момент, возникающие в сечениях контурной балки

$$N = EF_y \varepsilon_y; \quad Q_x = \frac{\partial M_1}{\partial y}; \quad Q_z = \frac{\partial M_z}{\partial y}; \quad M_k = GJ_p \theta,$$

где M_1, M_2 – изгибающие моменты;

ε_y – относительная деформация;

$\theta = d\varphi / dy$ – относительный угол закручивания;

φ – угол закручивания.

Используя дифференциальное уравнение изгиба бруса, находим, что

$$M_1 = -(EJ_x)_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \quad M_2 = -(EJ_z)_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

Силы и момент (S, N_x, R_x, M_x) , передаваемые с оболочки на контурное ребро, определяются по формулам

$$\begin{aligned} S &= \frac{Eh}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad N_x = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial y} - w(k_x + \mu k_y) \right], \\ R_x &= D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right]; \quad M_x = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

3.2. Разностная аппроксимация уравнения контурного элемента.

Вопрос о разностной аппроксимации динамических уравнений контурного элемента является одним из основных вопросов в решении поставленной задачи. Аппроксимируя (3) и (4) в конечных разностях, мы получим формулы для определения перемещений и углов поворота в узлах сетки на линии контура. С целью исключения вне контурных перемещений при аппроксимации уравнений для края используем односторонние (левые) разности в производных функциях по x и соответственно для края $y = b/2$ в производных по u и w .

3.3. Колебания оболочки с учётом инерции контурного элемента.

Рассмотрена оболочка, нагруженная равномерно распределённой импульсной нагрузкой. Контурные элементы оболочки могут колебаться в продольном и поперечном направлениях, а также скручиваться.

Продольные колебания контурного элемента. Предполагается, что контурный элемент оболочки колеблется только в продольном направлении (рис.11, а). Проектируя силы на продольную ось бруса, получим соответствующие уравнения равновесия для края $x = a/2$ и $y = b/2$ в виде

$$\begin{aligned} E_k F_k \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + S_1 - \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\ E_k F_k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + S_2 - \bar{m} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где
$$S_1 = \frac{Eh}{2(1+\mu)} \frac{\partial v}{\partial x}; \quad S_2 = \frac{Eh}{2(1+\mu)} \frac{\partial u}{\partial y}.$$

При этом на краях оболочки выполняются условия

$$u = w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0; \quad v = w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

Считая, что угловая точка неподвижна и контурные элементы связаны жестко друг с другом, можно написать

$$u = v = w = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = 0.$$

а)

б)

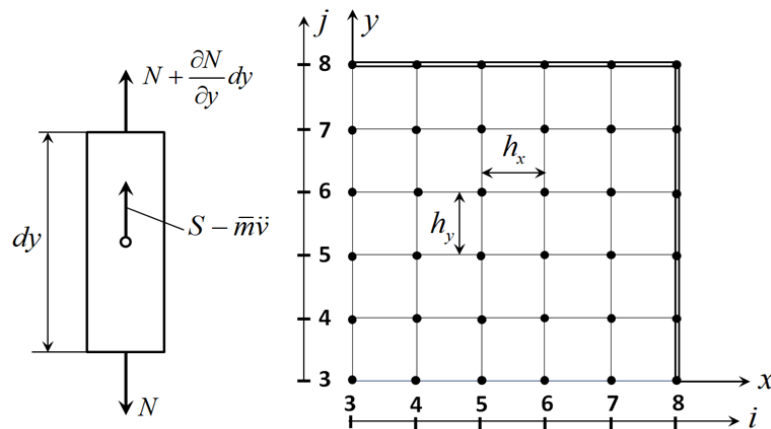


Рисунок 11. К уравнениям продольных колебаний контурного элемента

Разработана компьютерная программа на языке Фортран и получены результаты численного моделирования с использованием сетки, представленной на рисунок 12.

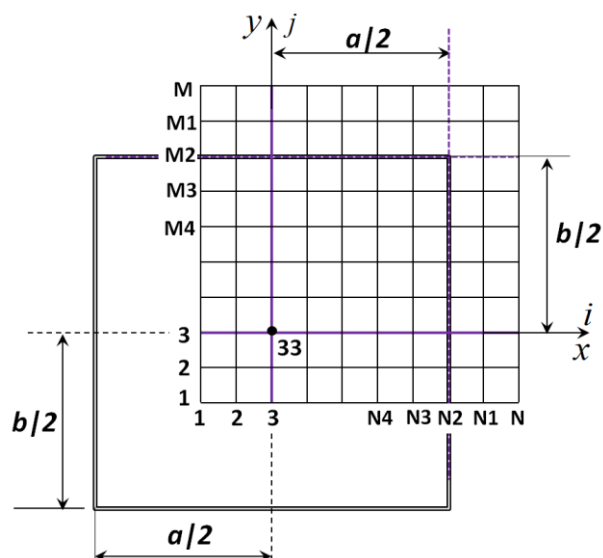


Рисунок 12. Разностная сетка для четверти оболочки

Как показали расчёты, колебания всех точек контурного элемента происходят в одной фазе с максимальной амплитудой в точке (8,5) (рис. 11, б). На рис. 13 представлен график изменения продольного перемещения точки N2,5. Продольные колебания контурной точки N2,5, как видно из рис. 13, имеют сложный характер изменения, так же как вертикальные колебания центра оболочки (рис. 14).

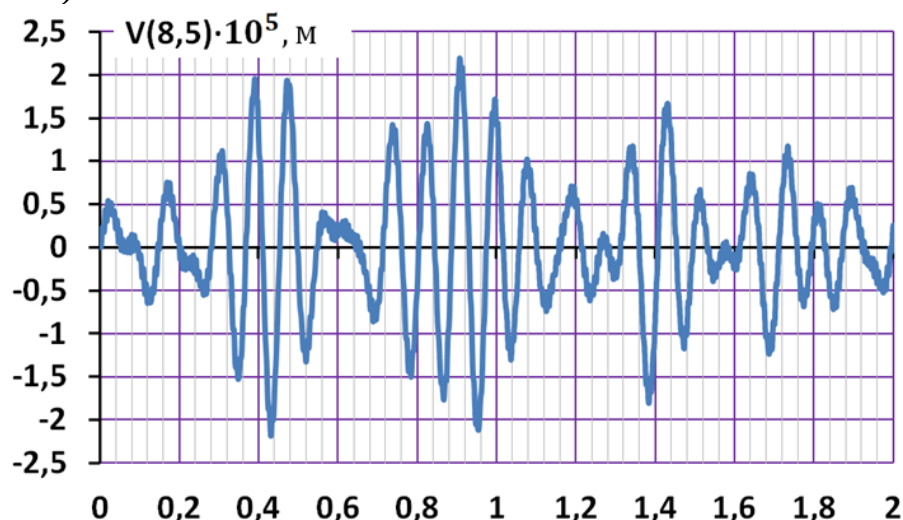


Рисунок 13. Продольные колебания контурного элемента

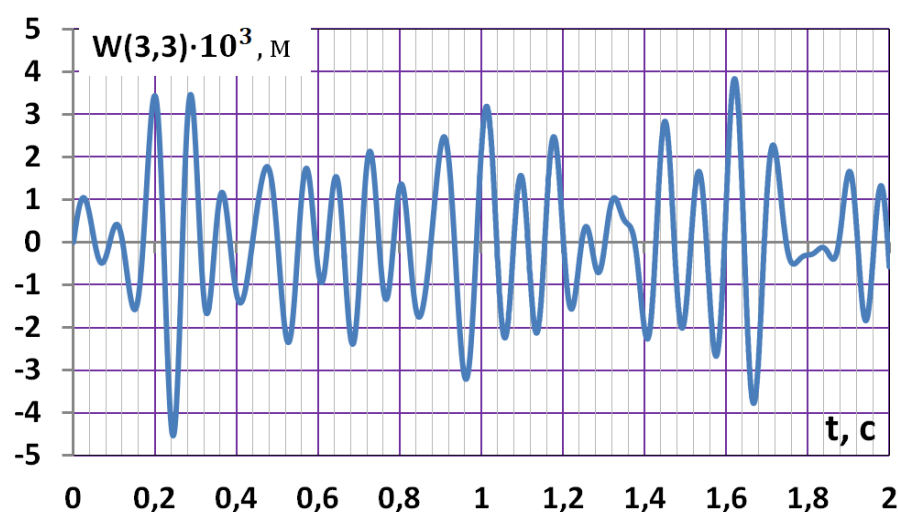


Рисунок 14. Вертикальные колебания центра оболочки

Далее в этом же параграфе рассмотрены поперечные колебания контурного элемента в вертикальной плоскости, поперечные колебания контурного элемента из плоскости, а также крутильные колебания контурного элемента.

3.4. Колебания оболочки с учетом пространственной работы контурного элемента. Контурные элементы оболочки испытывают одновременно деформаций растяжение-сжатие и изгиба в вертикальных и горизонтальных плоскостях. Здесь рассмотрено изгибно-продольные движения

контурного элемента в пространстве без кручения. В этом случае уравнения равновесия для края представляются в виде

$$\begin{aligned}
 E_k F_k \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - k_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{Eh}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\
 E_k J_x \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} + \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial y} - w(k_x + \mu k_y) \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\
 E_k J_z \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0,
 \end{aligned} \tag{7}$$

а для края соответственно записываются в виде

$$\begin{aligned}
 E_k F_k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - k_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{Eh}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \bar{m} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\
 E_k J_y \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial v}{\partial y} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} - w(k_y + \mu k_x) \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\
 E_k J_z \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0.
 \end{aligned} \tag{8}$$

В этом параграфе также рассматриваются изгибно-крутильные колебания контурного элемента оболочки.

3.5. Примеры расчета пологой оболочки с учетом работы контурных элементов. Здесь проведено исследование колебания оболочки с учетом деформаций контурных элементов. Оболочки, применяемые в качестве покрытия, в большинстве случаев имеют контурные элементы. Моделирование динамической задачи оболочки с учетом деформации контурного элемента представляет собой одну из сложных задач строительной механики. Предполагается, что пологая оболочка соединяется с контурными ребрами таким образом, что эта связь характеризуется четырьмя неизвестными усилиями R_x, N_x, S, M_x

Разработана компьютерная программа и получены результаты расчёта оболочки с учётом изгибно-продольных колебаний контурного элемента. На рис.15 - 17 показаны графики вертикальных колебания центра и середине края квадратной оболочки при различных значениях размеров поперечного сечения контурного элемента.

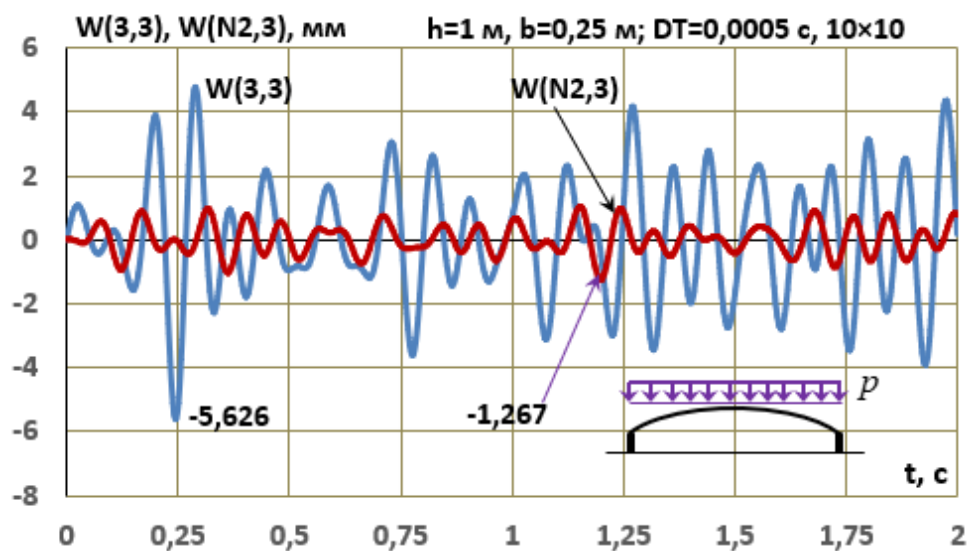


Рисунок 15. Колебания оболочки при $b=0,25$, $h=1$ м.

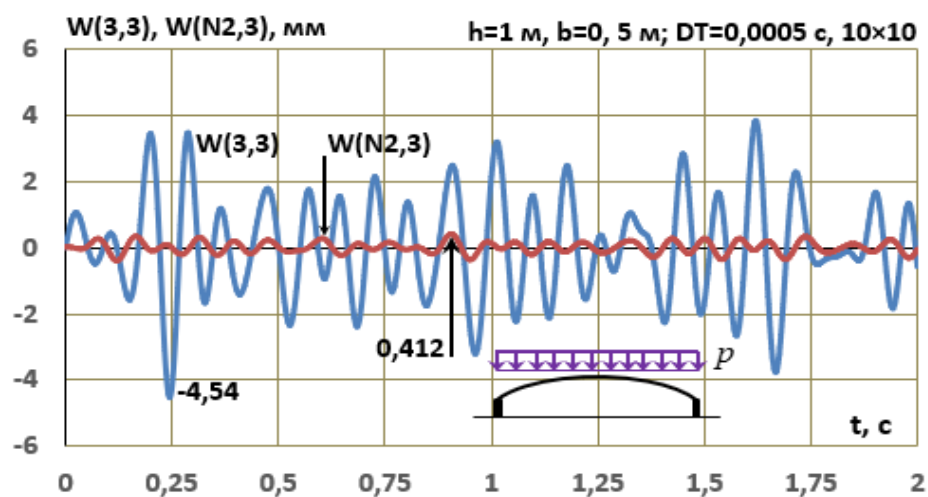


Рисунок 16. Колебания оболочки при $b=0,50$, $h=1$ м.

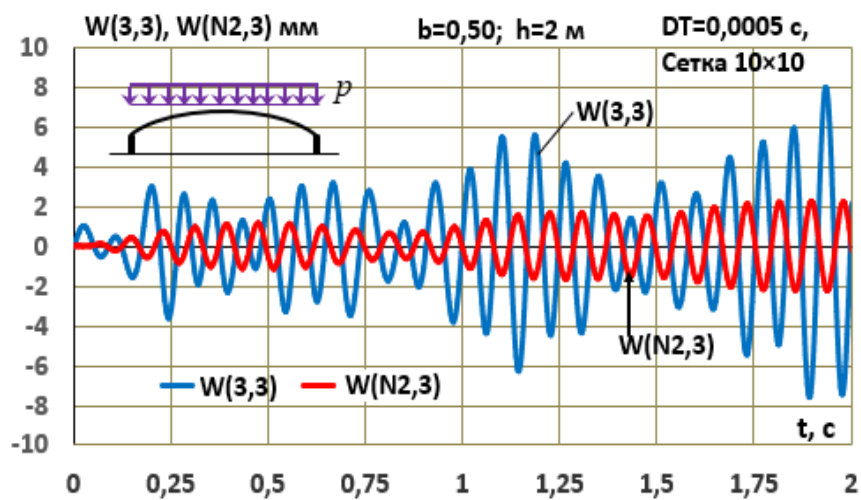


Рисунок 17. Колебания оболочки при $h=2$, $b=0,50$ м.

На рис.18 приведены графики изменения нормальной силы и изгибающего момента в центре оболочки, а также нормальной силы в середине контура.

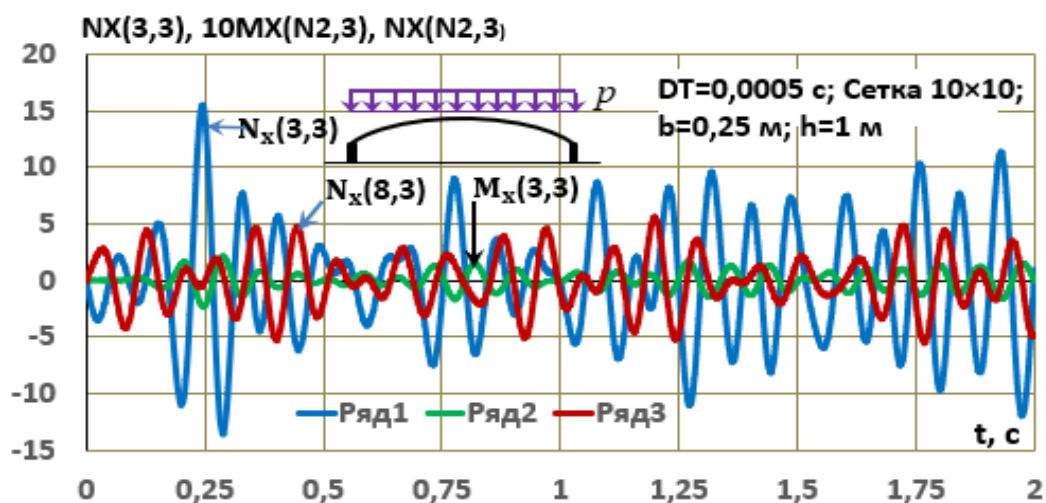


Рисунок 18. Нормальные силы и изгибающий момент при $b=0,50$, $h=1$ м.

На рис.19 приведены графики изменения перемещения в центре оболочки при различных значениях размера поперечного сечения контурного элемента.

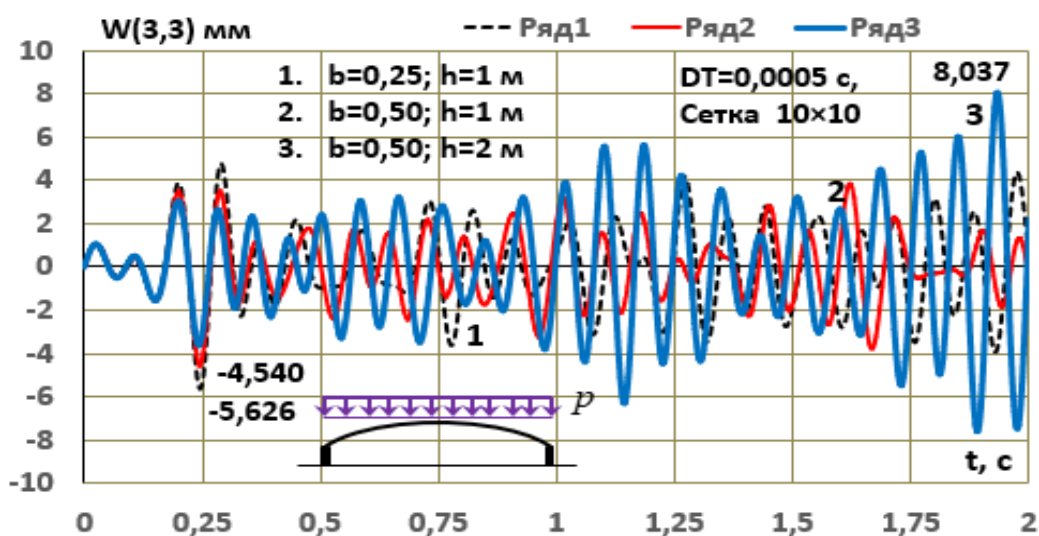


Рисунок 19. Колебания центра оболочки с учётом изгибно-продольных колебаний контурного элемента

Четвёртая глава. «Совместная работа оболочки с контурными элементами и поддерживающими конструкциями» посвящена расчету пространственной работы оболочки с различными граничными условиями. Глава состоит из 4 параграфа и заканчивается выводами.

4.1. Оболочка с упругоподатливыми опорами. Здесь рассмотрено задача, когда оболочка с упругими контурными элементами опирается по углам на упругоподатливые опоры в горизонтальной плоскости и испытывает действие распределённой горизонтальной импульсивной нагрузки, приложенной по краям. Внешняя нагрузка прикладывается по осям контурных элементов,

которые совпадают с серединой поверхностью оболочки. Опорные связи в углах расположены на нижней части контурного элемента и имеют эксцентриситет e . Нагрузка $q(t)$ действует в промежутке времени Δt ($\Delta t \leq 1/100$ периода колебаний), после чего начинаются свободные колебания системы и, вследствие деформативности контурных элементов, угловые точки перемещаются.

4.2. Реакция системы «стержень - контурный элемент- оболочка».

Здесь оболочка с упругими контурными элементами опирается по углам на колонны, опорные части, которых испытывают симметричное внешнее воздействие. Физическая сущность задачи состоит в том, что внешнее воздействие приводит в движения стержень и в стыке с оболочкой возникают силы, которые в свою очередь деформируют контурный элемент и тем самым оболочку. При шарнирном опирании, если считать, что стержень в продольном направлении не двигается, в каждом углу возникают по две силы. В силу симметрии можно рассмотреть только 1/4 часть оболочки и один стержень. Сначала, предполагая, что силы $x(t)$ и $y(t)$ известны, рассматривается расчёта оболочки с контурными элементами.

По изложенным алгоритмом составлена компьютерная программа и получены результаты численного моделирования динамической задачи. На рис. 20-21 приведены результаты расчёта колонны. График изменения силы взаимодействия между колонной и оболочкой показан на рис. 22.

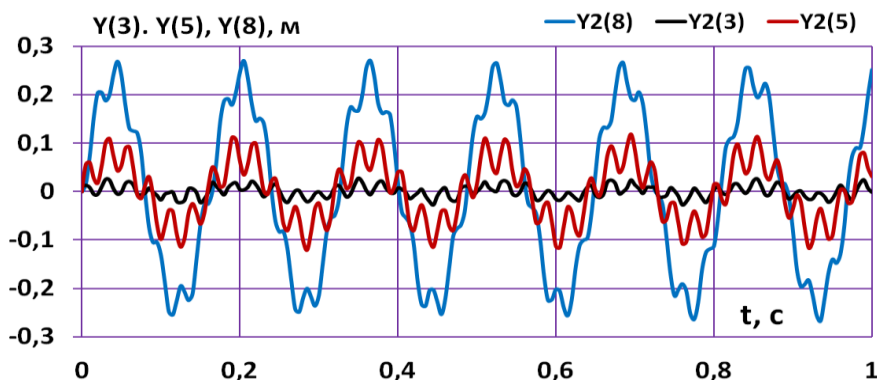


Рисунок 20. Перемещения колонны с учётом действия сжимающей силы от веса оболочки

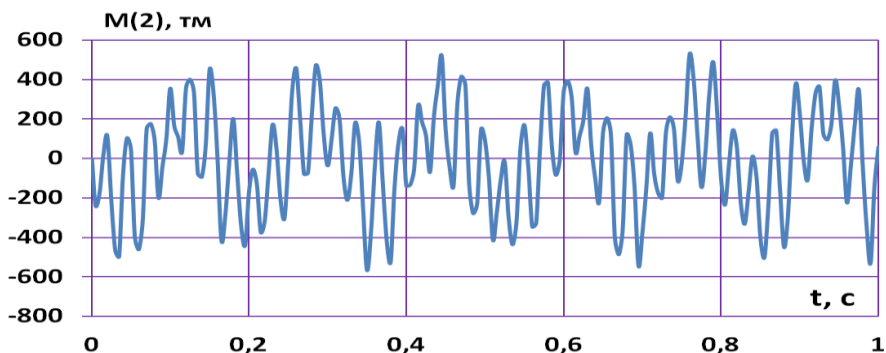


Рисунок 21. Изгибающий момент в опорной части колонны

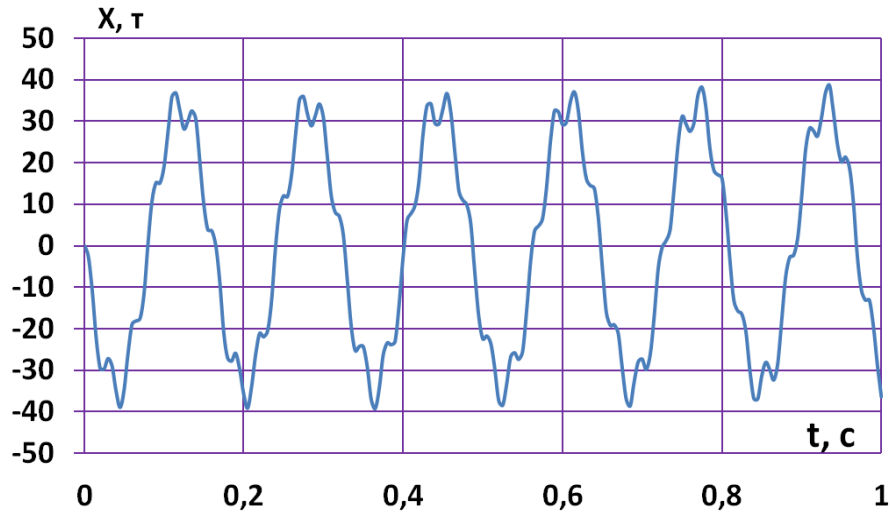


Рисунок 22. Сосредоточенная сила взаимодействия между оболочкой и колонны от заданного начального перемещения

4.3. Вращательно-поступательное движение диска оболочки с упругими опорами. С целью изучения вращательно-поступательного движения оболочки рассмотрена динамическая модель. Здесь опорные стержни заменены упруго-податливыми опорами с соответствующий коэффициентами по осям x и y . При этом считаем, что стержни невесомые и в них возникают незначительные крутящий моменты, которыми можно пренебречь. Кроме того, стержни в продольном направлении не деформируемы.

Уравнения движения диска с тремя степенями свободы представляются в виде

$$\begin{aligned}
 \sum x &= m\ddot{u} - R_{1x} - R_x + R_{3x} + R_{4x} - P_x = 0, \\
 \sum y &= m\ddot{v} - R_{1y} - R_{2y} + R_{3y} + R_{4y} - P_y = 0, \\
 \sum M &= mi^2\ddot{\alpha} - \frac{b}{2}(-R_{1x} + R_{2x} - R_{3x} + R_{4x}) - \\
 &\quad - \frac{a}{2}(R_{1y} - R_{2y} + R_{3y} - R_{4y}) + P_x \frac{b}{2} - P_y \frac{a}{2} = 0,
 \end{aligned} \tag{9}$$

Перемещения угловых точек через перемещения центра масс выражаются следующими соотношениями

$$\begin{aligned}
 u_1 &= u - \frac{b\alpha}{2} - \frac{a\alpha^2}{4}, & v_1 &= v + \frac{a\alpha}{2} + \frac{b\alpha^2}{4}, \\
 u_2 &= u + \frac{b\alpha}{2} + \frac{a\alpha^2}{4}, & v_2 &= v + \frac{a\alpha}{2} - \frac{b\alpha^2}{4}, \\
 u_3 &= u + \frac{b\alpha}{2} - \frac{a\alpha^2}{2}, & v_3 &= v - \frac{a\alpha}{2} - \frac{b\alpha^2}{2}, \\
 u_4 &= u - \frac{b\alpha}{2} - \frac{a\alpha^2}{2}, & v_4 &= v - \frac{a\alpha}{2} + \frac{b\alpha^2}{4}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Подставив (10) в (9) имеем

$$\begin{aligned}
 m \ddot{u} &= -uc_{1x} + \frac{b\alpha}{2}c_{2x} - \frac{a\alpha^2}{4}c_{3x} + P_x, \\
 m \ddot{v} &= -vc_{1y} + \frac{a\alpha}{2}c_{2y} - \frac{b\alpha^2}{4}c_{3y} + P_y, \\
 m i^2 \ddot{\alpha} &= uc_{1x} \frac{b}{2} + vc_{1y} \frac{a}{2} - \frac{b^2\alpha}{4}c_{1x} - \frac{a^2\alpha}{4}c_{1y} + \\
 &+ \frac{ab\alpha^2}{8}c_{xy} + P_y \frac{a}{2} - P_x \frac{b}{2}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Из разностной аппроксимации (11) находим

$$\begin{aligned}
 u^{n+1} &= \left(2 - c_{1x} \frac{\tau^2}{m}\right) u^n + c_{2x} \frac{b\tau^2}{2m} \alpha^n - c_{3x} \frac{a\tau^2}{4m} (\alpha^2)^n + \frac{\tau^2}{m} P_x - u^{n-1}, \\
 v^{n+1} &= \left(2 - c_{1y} \frac{\tau^2}{m}\right) v^n + c_{2y} \frac{a\tau^2}{2m} \alpha^n - c_{3y} \frac{b\tau^2}{4m} (\alpha^2)^n + \frac{\tau^2}{m} P_y - v^{n-1}, \\
 \alpha^{n+1} &= \frac{c_{1x}b}{2mi^2} u^n + \frac{c_{1y}a}{2mi^2} v^n + \left(2 - \frac{c_{1x}b^2}{4mi^2} - \frac{c_{1y}a^2}{4mi^2}\right) \alpha^n + \\
 &+ \frac{abc_{xy}}{8mi^2} (\alpha^2)^n + P_y \frac{a}{2mi^2} - P_x \frac{b}{2mi^2} - \alpha^{n-1}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

При увеличении поперечных сечений стрижней в два раза амплитуда и период колебания поступательных движений уменьшаются в 4 раза. В случае, когда силы равны, и, что соответствует только поступательному движению системы. На рис.23-25 приведении результата расчёта системы.

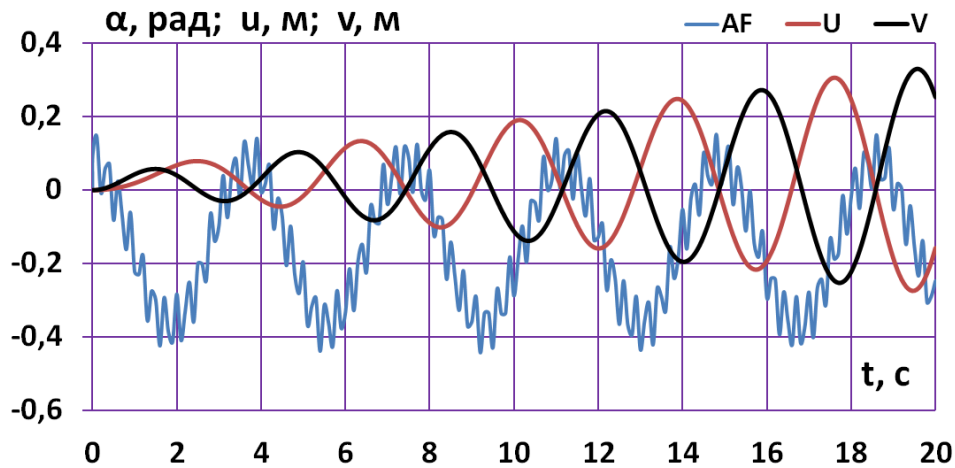


Рисунок 23. Вращательно-поступательное движение диска оболочки при $H = 12 \text{ м}$

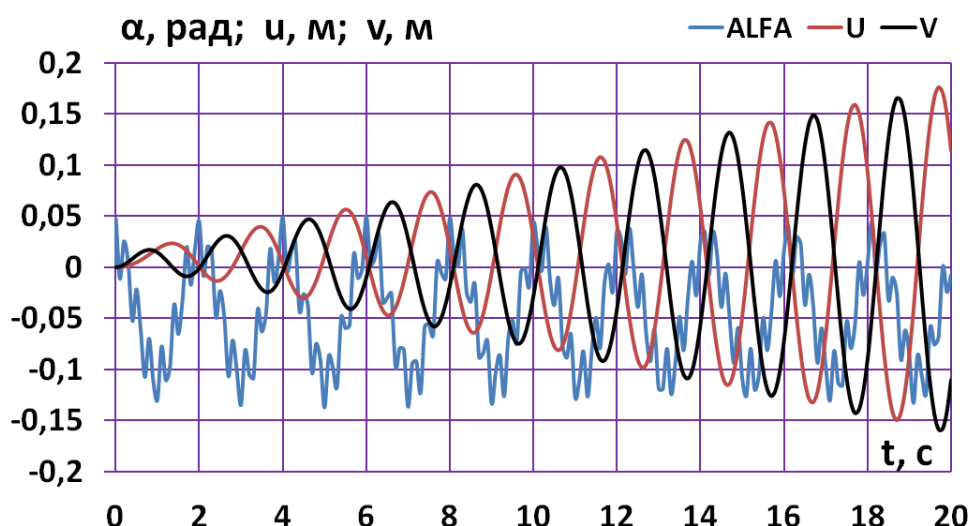


Рисунок 24. Вращательно-поступательное движение диска оболочки при длительном действии нагрузки

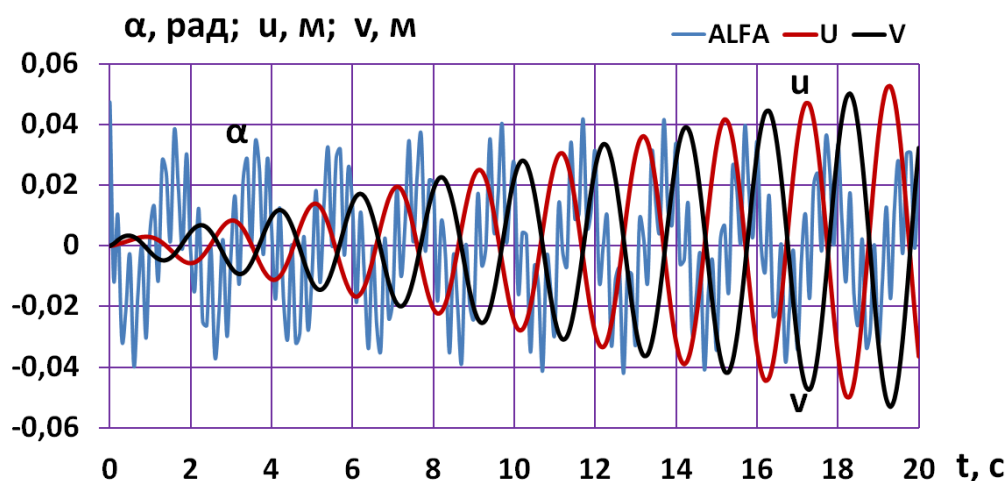


Рисунок 25. Вращательно-поступательное движение диска оболочки при кратковременной нагрузке

Далее рассмотрен случай, когда внешнее воздействие прикладывается к опорной части колонны, и ее массу необходимо учитывать. Как было указано выше, предположим, что внешнее воздействие прикладывается только к одной из опор. Остальные опоры при этом находятся в покое и действия соответствующих стержней заменяются упругими опорами. Полученная таким образом расчетная модель позволяет решить задачу с учетом поперечного колебания колонны.

4.4. Сравнения результатов, полученных на основе предложенной методики, с результатами точного решения. С целью проверки достоверности результатов, полученных на основе разработанной методики, были проведены сравнения с известными решениями. Для этого сначала были рассмотрены поперечные колебания балки с равномерно распределённой массой и различными закреплениями.

В качестве примера была рассмотрена балка длиной 6 м с поперечным сечением 0,5х0,5 м, модулем упругости и массой

$$E = 2 \cdot 10^6 \text{ т/м}^2, \quad m = (\gamma/g)F = 0,045 \text{ тс}^2/\text{м}^4.$$

Для балки с одним свободным концом частота основного тона равняется $\omega_1 = 45,70 \text{ с}^{-1}$ ($f = 7,28 \text{ Гц}$).

Для второго стржня из формулы для определения частота свободных колебаний получим, что $\omega_1 = 205,36 \text{ с}^{-1}$ и $f_1 = 32,00 \text{ Гц}$. При этом более чем в 4 раза увеличивается частота по сравнению с первым случаем закрепления.

Теперь обратимся к результатам, полученным на основе численного решения дифференциального уравнения поперечного движения балки по алгоритму, представленного в п.4.2 диссертации. Расчеты проводились для сетки с шагом 1м и шагом по времени $\tau = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Частота колебания для консольной балки $f = 7,31 \text{ Гц}$, а для второй - $f = 30,6 \text{ Гц}$. Относительная ошибка для первой балки составляет 0,4%, а для второй - 4,2%.

Кроме того, была рассмотрена система с одной степенью свободы, движения которой, без учета затухания, описывается дифференциальным уравнением

$$m\ddot{y} + ky = 0 \quad \text{или} \quad \ddot{y} + \omega^2 y = 0, \quad (13)$$

где $\omega = \sqrt{k/m}$ – частота свободных колебаний.

Решение (13) при $k=1$, $m=1$, приводит гармоническому колебанию с периодом $T = 6,28 \text{ с}$ и частотами

$$\omega = 1 \text{ с}^{-1}, \quad f = 0,159 \text{ Гц}.$$

Решая эту задачу методом конечных разностей, из аппроксимации (13) находим

$$y^{n+1} = \left(2 - \frac{k^2}{m} \tau^2 \right) y^n - y^{n-1} + P \frac{\tau^2}{m}, \quad (14)$$

где P – импульсивное воздействие;

τ – шаг по времени.

Примем, что $P=1$ и действует на промежутке $\Delta t = 0,1 \text{ с}$, $k=1$, $m=1$, $\tau=0,1 \text{ с}$. Тогда согласно (14) получим закон изменения, представленный на рис.23. Как следует из рис.23, при $k=1$ получим $f = 0,16 \text{ Гц}$, что на 0,6% отличается от точного значения. При значении $k=2$ уменьшается амплитуда, а частота увеличивается до $f = 0,22 \text{ Гц}$.

Заключение

Общие выводы

1. Изучено динамическое поведение пологой тонкой упругой оболочки, квадратной в плане, при равномерной-распределённом импульсивном воздействии. На основе численных экспериментов выявлены граница шага по времени в зависимости от шага по пространственным координатам. При этом рассмотрены сетки 6х6, 8х8, 10х10, 12х12. Исследовано влияние сгущения сетки на результаты динамического расчёта и показано, что оптимальной является сетка 10х10 (для рассмотренной задачи) [2-А].

2. На основе разработанного алгоритма и программы расчёта выявлена реакция оболочки при следующих граничных условиях: жёсткое защемление, шарнирно - неподвижное опирание, шарнирно - подвижное опирание [1-А].

3. Исследовано динамическое поведение пологой оболочки с учётом податливости контурных элементов. Получены уравнения движение контурного элемента с допущением, что его ось совпадает со срединной поверхностью оболочки. Из разностной аппроксимации этих уравнений получены рекуррентные формулы для определения перемещений и углов поворота контурного элемента [2-А].

4. Разработана методика и получены результаты колебаний оболочки с учетом продольных, поперечных из плоскости, поперечных в плоскости и крутильных колебаний контурного ребра. Сравнение этих результатов показали, что движение контурного ребра из своей плоскости значительно меняет картину динамического поведения оболочки (например, по сравнению с поперечными движением в плоскости, средние значение прогиба центра оболочки увеличиваются на 30%, нормальной силы и изгибающего момента, наоборот уменьшается соответственно на 22 и 60%). Результаты получены при различных размерах поперечного сечение ребра [4-А].

5. По разработанной методике получены решения задач о динамического поведения оболочки с учётом изгибно-продольных и изгибно-крутильных колебаний контурного ребра. Анализ полученных результатов показывает, что при изгибно-продольном колебания ребра по сравнению с его изгибно-крутильным, средние значения прогиба в центре оболочки увеличиваются на 16%, а нормальной силы и изгибающего момента, наоборот, уменьшается соответственно на 5% и 11% [1-А].

6. Изгибно-продольные колебания контурного ребра (сечение 1х0,5) приводят в целом к уменьшению внутренних усилий и перемещение в узлах оболочки по сравнению с идеальной диафрагмой при упругих равных условиях. Нормальная сила и сдвигающее усилие уменьшается примерно на 15-20%, прогиб и изгибающий момент- на 20-25% [1-А].

7. Исследовано динамическое поведение оболочки с учётом работы поддерживающий конструкций. Показано, что рассмотрение поддерживающих конструкций в виде упруго-податливых опор приводит к увеличению амплитуды и периода колебаний центра оболочки [4-А].

8. Разработан алгоритм и получены результаты колебания оболочки с учетом изгибно-продольных колебаний контурного ребра и упруго-податливыми закреплениями угловых точек. Получено решение задачи о поступательно-вращательном движении диска оболочки при несимметричном воздействии [1-А].

9. Сравнение известных результатов решения задачи о поперечном колебании балки с различными граничными условиями и системы с одной степенью свободы с результатами решения этих же задач по предлагаемой методике приводит к заключению, что применяемый в работе метод даёт достаточно точные значения для частоты первого тона. Таким образом, учёт деформативности контурных элементов и поддерживающих конструкций позволяет более точно определить реакцию оболочки в зависимости от времени по сравнению с оболочками с идеальными диафрагмами и жёсткими поддерживающими конструкциями, и может быть рекомендован для реального проектирования оболочек в сейсмических районах, а также для восприятия других динамических воздействий [3-А, 5-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные алгоритм и компьютерные программы позволяют исследовать динамическое поведение пологой оболочки при различных воздействиях, в том числе сейсмических и могут быть использованы для сопоставительного анализа сейсмической реакции в проектных институтах.

Предложенные методики расчёта и разработанные автором компьютерные программы, основанные на методе конечных разностей использованы в практике проектирования проектного института «Душанбешахрсоз» для выполнения сопоставительных расчётов покрытий в виде тонкой пологой оболочки на действие сейсмических сил.

Разработанная компьютерная программа динамического расчёта пологой оболочки методом конечных разностей в дальнейшем будет использовано при проектировании одноэтажных зданий различных конструктивных схем.

Теоретические и прикладные задачи диссертации используются в учебном процессе Хорогского государственного университета им. М.Назаршоева для специальности 1700401-01 «Гидротехнического строительство» при подготовке магистров, докторов *PhD* и при проведении экспертизы рабочих проектов одноэтажных каркасных зданий.

**Основные результаты работы опубликованы в следующих изданиях.
Статьи в изданиях, рекомендуемые ВАК при Президенте Республики
Таджикистан.**

[1-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное решение динамической задачи пологой оболочки методом конечных разностей [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова //Вестник Таджикского технического университета. Серия инженерных исследований. - 1(61) 2023. - С. 170-175.

[2-А] **Джонмамадова М.Т.** Динамическое исследование пологих оболочек [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова // Вестник Таджикского технического университета. Серия инженерных исследований. - 2 (62) 2023. - С. 206-214.

[3-А] **Джонмамадова М.Т.** Моделирование динамической задачи пологой оболочки. [Текст] / Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Джонмамадова М.Т. //Вестник Таджикского технического университета. Серия инженерных исследований, №3 (63) 2023. - С. 155 -164.

[4-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное моделирование динамических задач пологой оболочки [Текст] / /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова, А.П.Мамаднабиева //Вестник Хорогского университета. Серия инженерных исследований - (ISSN 22664-54696), № 2, 2024. - С. 215-221.

[5-А] **Джонмамадова М.Т.** Методы исследования колебаний оболочек при сейсмических воздействиях. //Вестник Хорогского университета. Серия инженерных исследований - (ISSN 22664-54696), №4, 2024. - С. 201- 204.

Статьи в материалах конференции.

[6-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное моделирование динамических задач пологих оболочек методом конечных разностей [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова //Международная научно-теоретическая конференция «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горных условий: проблемы, новые подходы и актуальные исследования», посвящённой 30 - летию сессии Верховного совета Республики Таджикистан и 30 - летию Хорогского государственного университета им. М. Назаршоева. Хорог, 2022. - С. 32-36.

[7-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное моделирование пологой оболочки от динамического воздействия [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова // Материалы республиканской научно - практической конференции (с международным участие) «Вклад женщин в развитие архитектуры и строительство Таджикистана» посвящённой 20 летию

изучения и развития естественных, точных и математических дисциплин в области науки и образования (2020-2040г.) Душанбе, 28 ноября 2023.- С. 56-60.

[8-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное решение динамических задач пологой оболочки [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова // Материалы республиканской научно - практической конференции «Архитектура и градостроительство». Часть 1. ТТУ им. акад. М.С.Осими. Душанбе, 26.03.2024. - С. 214-218.

[9-А] **Джонмамадова М.Т.** Решение задач по расчёту пологих оболочек [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова //Материалы III -й международной научно-теоретической конференции «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горного региона: проблемы, новые тенденции и соответствующие исследования» ХоҒу им. М Назаршоева, Хорог, 14-15 июня 2024 . - С. 27-31.

ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

ВБД 624.042(575.3)

Бо ҳуқуқи дастнавис



ҶОНМАМАД Мохру Тохир

**МОДЕЛСОЗИИ АДАДИИ МАСЪАЛАҲОИ ДИНАМИКИИ ҚИШРҲОИ
КАМФАРОЗ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т И

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмӣ
номзади илмҳои техникӣ аз руи ихтисоси

05.23.00 - Сохтмон ва меъморӣ

(05.23.17 - Механикаи сохтмон)

Душанбе - 2025

Диссертатсия дар кафедраи «Сохтмони саноатӣ ва шаҳрванди»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ ва озмоишгоҳи «Зилзилатобоварии биноҳо ва иншоот»-и Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИТ иҷро шудааст.

Рохбарони илмӣ:

Низомов Ҷаҳонгир Низомович, доктори илмҳои техникӣ, профессор, узви вобастаи АМИТ, мудири озмоишгоҳи «Зилзилатобоварии биноҳо ва иншоот»-и Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИТ

Қаландарбеков Имомёрбек, корманди шоистваи Тоҷикистон, доктори илмҳои техникӣ, профессори кафедраи «Сохтмони саноатӣ ва шаҳрванди»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

Муқарризони расмӣ:

Абдусаттаров Абдусамат, доктори илмҳои техникӣ профессори кафедраи «Механикаи амали»-и Донишгоҳи давлатии нақлиёти Тошкент, Ҷумҳурии Узбекистон

Исмоилзода Лутфулло Сулаймонӣ, номзади илмҳои техникӣ, дотсент, сардори шуъбаи таҳхиси лоиҳаҳои роҳҳо, пулҳо ва нақбҳои нақлиётӣ, КВД «Таҳхисгар»-и Раёсати экспертизаи давлатӣ

Муассисаи пешбар:

Институти политехникии Ҷизак, Ҷумҳурии Узбекистон

Ҳимояи диссертатсия «30» декабри соли 2025 соати 14⁰⁰ дар ҷаласаи шурои диссертатсионии 6D.KOA-027 нази Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ бо суроғай: 734042, ш. Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10^A, баргузор мегардад. E-mail: dis.sia@mail.ru

Бо матни диссертация дар китобхона ва сомонаи расмии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, www.ttu.tj шинос шудан мумкин аст.

Автореферати диссертатсия «___» _____ соли 2025 фириастода шуд.

Котиби илмии
шурои диссертатсионӣ,
доктори PhD

Шокиров Р.М.

МУҚАДДИМА

Мубрамии мавзӯ. Қишрҳо дар соҳаҳои гуногун васеъ истифода бурда мешаванд: сохтмон, мошинасозӣ, киштисозӣ ва ғайра. Ин пеш аз ҳама қобилияти баланди борбардории конструкцияҳои тунукдевор, рационалӣ ва камхарч будани онҳоро мефаҳмонад. Инкишофи назарияи умумии қишр бо корҳои бунёдии В.З.Власов, А.С.Волмир, А.Л.Голденвейзер, А.И.Луре, Х.М.Муштари, В.В.Новожилов, С.П.Тимошенко ва ғайраҳо алоқаманд мебошад. Қишр камфароз номида мешавад, агар болоравии равоқ ба камтарин андозаи ҳаттии дар нақша аз як тақсими панҷ кам ё баробар бошад.

Дар назарияи қишрҳои камфароз, ҳамчунон ки дар назарияи умумии варақаҳо ва қишрҳо, ҷои махсусро масъалаҳои ишғол мекунанд, ки ба ҳалли масъалаҳои динамикӣ марбутанд. Таҳқиқоти назарияи динамикии қишрҳо ба ду самт метавон тақсим кард: 1) корҳое, ки ҳам бо усулҳои таҳлилӣ ва ҳам ададӣ иҷро шуда, ба таҳқиқоти лаппишҳои хусусӣ бахшида шудаанд; 2) корҳое, ки ба масъалаҳои муайянкунии ҷойивазкуниҳо ва шиддатҳои динамикӣ вобаста ба вақт марбутанд. Ҳалли масъалаҳои самти дуюм, одатан, ҳалли масъалаҳои лаппишҳои хусусиро низ дар бар мегирад ва дар иҷрои ададӣ бо як қатор душвориҳои иловагӣ, ки ба масъалаҳои наздикшавии ҳал ва саҳеҳии он вобастаанд, ру ба ру мешавад.

Дар шароити тадбиқ намудани қишрҳо ҳамчун болопуши биноҳо ва иншоот дар ноҳияҳои заминларзаӣ хавфнок, масъалаи ҳисобкунии динамикии онҳо барои таъсири динамикӣ хеле ҳам мубрам аст. Таҳлили динамикии қишрҳо яке аз масъалаҳои муҳим ва ҳамзамон мураккаби механикаи сохмонӣ мебошад. Аксаран дар чунин ҳисоб ба муайян кардани шаклҳо ва зуддиҳои (частоты) лаппишҳои хусусӣ маҳдуд мешаванд. Азбаски қишрҳои болопуш, одатан, унсурҳои контурӣ доранд, таҳқиқи рафтори динамикии конструкция асосан бар ҳалли муштараки муодилаи ҳаракати қишр ва унсури канорӣ мувофиқ аст. Омӯзиши рафтори динамикии система имкон медиҳад, ки ғайр аз ҳолат ва шакли лаппиш, тағйирёбии ҷойивазкуниҳо ва қувваҳо вобаста ба вақт муайян карда шавад.

Конструкцияҳое, ки қишрро дастгирӣ мекунанд, низ таъсири динамикӣ мегиранд. Аз ин рӯ, масъалаи омӯзиши рафтори динамикии тамоми системаи фазой «конструкцияҳои дастгиркунанда - унсурҳои канорӣ - қишр» актуалӣ мебошад.

Дарачаи илмӣ коркарди таҳқиқи мавзӯ. Талаботи асосӣ ба усулҳои ҳисобӣ коҳиши меҳнаталобӣ ҳисоб ҳангоми нигоҳ доштани саҳеҳии кофӣ дар ҳалли бадастомада мебошад. Саҳми бузург дар таҳқиқи болопушҳои фазоии тунукдевор, хусусан дар инкишофи назарияи умумии қишрҳо, олимони зерин

гузоштаанд: В.З. Власов, А.С. Волмир, А.А. Голденвейзер, Н.А. Килчевский, А.И. Луре, Х.М. Муштари, В.В. Новожилов, Ю.Н. Рабинов, А.Р. Ржаницын, В.И. Федосев, А. Лава, С.П. Тимошенко, В. Флюге, В.В. Болотин, Э.И. Григолюк, В.Е. Береславский, О.В. Лужин, П.М. Огибалов, О.Д. Ониашвили ва дигарон.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо ва мавзуҳои илмӣ. Ин таҳқиқот дар чорчӯбаи мавзуҳои илмии таҳқиқоти корҳои илмии кафедраи «Сохтмони саноатӣ ва шаҳрванди»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ ва озмоишгоҳи «Зилзилатобоварии биноҳо ва иншоот» -и Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИТ коркард шудааст. Диссертатсия бевосита ба «Стратегияи инкишофи соҳаи сохтмони Ҷумҳурии Тоҷикистон дар оянда барои то соли 2030», қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 27 апрели соли 2022 таҳти №203 равона карда шудааст.

Тавсифи умумии таҳқиқот

Мақсади кори диссертатсия - моделсозии адабии масъалаҳои динамикии назарияи қишрҳои камфароз, инчунин коркарди алгоритмҳо ва барномаҳои компютерӣ мебошад.

Масъалаҳои таҳқиқот:

- коркарди методикаи ҳисоби қишри камфароз бо шартҳои гуногуни сарҳадӣ аз таъсири импурсивӣ бо методи фарқиятҳои охирик;
- муқаррар намудани ҳудудҳои тағйирёбии қадам бо мурури вақт вобаста ба қадами координатаҳои фазой;
- омӯзиши таъсири зичигардонии симтур ба натиҷаҳои ҳисоби динамикӣ бо мақсади интиҳоби фарқияти симтури оптималӣ;
- коркарди алгоритми ҳисоби қишри камфароз бо дарназардошти лаппишҳои тӯлӣ, амудӣ, чархзананда ва лаппишҳои ҳақиқӣ - тӯлӣ ва ҳақиқӣ - чархзанандаи унсурҳои канорӣ;
- таҳқиқи рафтори динамикии қишр бо конструкцияҳои дастгиркунанда ҳангоми ҳаракати гардишӣ-ҳаттии диски қишр.

Объекти таҳқиқот қишрҳои камфароз ҳамчун унсурҳои конструксионӣ мебошанд, ки ба таъсири динамикӣ мавриди таъсир қарор гирифта, бо истифода аз моделҳои механикаи муҳити зист ифода карда мешавад.

Предмети таҳқиқот - усулҳои адабӣ ва алгоритмҳои моделсозӣ барои равандҳои динамикӣ дар қишрҳои камфароз мебошад.

Навгони илмӣ таҳқиқот ба таври зерин мебошад:

- бо коркарди методика дар мисоли қишри камфароз, истифодабарии методи фарқиятҳои охирик барои ҳалли муодилаҳои динамикии моментӣ

нишон дода шудааст, худудҳои тағйирёбии қадам бо мурури вақт ва таъсири зичигардонии симтур бар натиҷаҳои ҳисоби ададӣ таҳқиқ карда шудааст;

– коркарди методика ва масъала оиди рафтори динамикии қишр бо дарназардошти лаппишҳои тулӣ, арзӣ берун аз ҳамворӣ, арзӣ дар ҳамворӣ ва чархзанандаи тегаи контурӣ; (контурное ребро) ҳал карда шудааст;

– масъалаи лаппиши қишр бо дарназардошти кори фазоии тегаи контурӣ ҳал карда шудааст;

– масъалаи лаппиши қишр бо дарназардошти инертсияи конструкцияҳои дастгиркунанда (дар ҳолати таъсири симметрӣ ба қисми таъғоҳии системаи «қишр-конструкцияҳои дастгиркунанда») ҳал карда шудааст;

– муодилаҳои ба даст оварда шуда, алгоритми ҳисоби хаттӣ-гардишии диски қишр коркардшудааст.

Аҳамияти назариявӣ ва амалии кор аз он иборат аст, ки методикаи коркард шуда ва барномаҳои компютери ҳисобӣ имконияти таҳқиқи рафтори динамикии қишрро дар якҷоягӣ бо унсурҳои канорӣ ва конструкцияҳои дастгиркунанда барои таъсири борҳои импульсивӣ медиҳанд. Ҳамаи ин ба муҳандисон - лоиҳакашон имконияти роҳи ҳисобе, ки амалан қабулпазир аст, барои ҳисоб кардани системаҳои «сутун-диафрагма-қишр» аз таъсири борҳои заминларза, садамавӣ, таркишӣ ва ғайра медиҳад.

Нуктаҳои ба ҳимоя пешниҳодашаванда:

– методикаи ҳисоби қишрҳои камфароз аз таъсироти импульсивӣ;
– натиҷаҳои ҳисоби қишр бо шартҳои гуногуни канорӣ;
– худудҳои ба даст омадаи тағйирёбии қадам бо мурури вақт вобаста ба қадам аз координатаҳои фазой, инчунин таъсири зичигардонии симтур бар натиҷаҳои ҳисоби динамикӣ;

– натиҷаҳои ҳисоби қишр бо дарназардошти лаппишҳои тӯлӣ, арзӣ, чархзананда, ҳамишӣ - тӯлӣ ва ҳамишӣ - чархзанандаи тегаи контурӣ;

– методика ва натиҷаҳои ҳисоби қишр бо дарназардошти кори конструкцияҳои дастгиркунанда;

– алгоритмҳо ва барномаҳои компютери ҳисобӣ ба забони ФОРТРАН.

Дарачаи эътимоднокии натиҷаҳо бо гузаронидани озмоишҳои ададӣ ва муқоисаи натиҷаҳои ба даст омада бо ҳалли аниқ тасдиқ мешавад.

Мувофиқати диссертатсия бо шиносномаи ихтисоси илмӣ. Диссертатсия бо шиносномаи ихтисоси илмӣ 05.23.17 «Механикаи сохмон», ки фаслҳои зеринро дар бар мегирад, мувофиқ аст:

1 – принципҳои умумии ҳисоб кардани иншоот ва унсурҳои онҳо;

4 – методҳои адабии ҳисоб кардани иншоот ва унсурҳои онҳо.

Саҳми шахсии доктарабӣ дарачаи илмӣ дар таҳқиқот ин аз гузаронидани озмоишҳои ададӣ оид ба ҳисоб кардани қишрҳои камфароз,

инчунин коркард, таҳлил ва умумиятбахши натиҷаҳои ба даст омада, тартиб додани хулосаҳо ва омода кардани мавод барои нашрияҳои илмӣ иборат аст.

Тасвиб ва амалисозии натиҷаҳои диссертатсия. Натиҷаҳои асосие, ки дар диссертатсия пешниҳод шудаанд, дар конференсияҳои зерин муҳокима карда шудаанд: конференсияи байналмилалӣ илмию назариявӣ «Рушди илм ва маориф дар шароити ҷаҳонишавӣ дар мисоли минтақаи куҳистон», бахшида ба 30-солагии ҷаласаи Шурои Олии Ҷумҳурии Тоҷикистон ва 30-солагии Донишгоҳи давлатии Хоруғ ба номи М. Назаршоев. Хоруғ, ДДХ ба номи М.Назаршоев, 11-12 ноябри соли 2022; конференсияи илмию амалии ҷумҳуриявӣ (бо иштироки байналмилалӣ) «Саҳми занон дар рушди меъморӣ ва сохтмони Тоҷикистон» бахшида ба 20-солагии омӯзиши ва рушди фанҳои табиӣ, дақиқ ва математикӣ дар соҳаи илм ва маориф (2020-2040). Душанбе, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С.Осимӣ, 28 ноябри соли 2023; конференсияи илмию амалии ҷумҳуриявӣ «Меъморӣ ва шаҳрсозӣ». Қисми 1. Душанбе, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С.Осимӣ, 26 марти соли 2024; конференсияи байналмилалӣ III-юми илмӣ- назариявӣ «Рушди илм ва маориф дар шароити ҷаҳонишавӣ дар мисоли минтақаи куҳистон: мушкилот, равишҳои нав ва таҳқиқотҳои дахлдор» 14-15 июни соли 2024.

Усули коркард шуда ба амалияи лоиҳакашии Институти «Душанбешаҳрсоз» ворид карда шудааст. Ҷабҳаҳои назариявӣ ва амалии кор аллакай дар раванди таълими Донишгоҳи давлатии Хоруғ ба номи М.Назаршоев барои ихтисоси 1700401-01 «Сохтмони гидротехникӣ» ҷорӣ карда шудааст (санадҳои татбиқкунанда дар замимаи диссертатсия оварда мешавад).

Интишорот. Маводҳои корҳои диссертатсионӣ дар 9 мақолаи илмӣ интишор шудаанд, ки аз онҳо 5-мақолааш дар маҷаллаҳои тавсияшудаи Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва 4 мақолаи дигар дар конференсияҳо нашр шудаанд.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, ҷор боб, хулосаҳои умумӣ, рӯйхати адабиётҳо иборат аз 211 номгу, аз ҷумла 12-тоашон ба забони хориҷӣ ва ду замима иборат мебошад. Ҳаҷми умумии кор 149 саҳифа (бе замима), бо назардошти 43 расм ва 10 ҷадвал иборат аст.

Мазмунӣ асосии диссертатсия

Дар муқаддима мувофиқияти мавзӯи кори диссертатсионӣ асоснок карда шуда, ҳадафу масъалаҳои таҳқиқоти диссертатсионӣ, наwgонии илмӣ, аҳамияти назариявӣ ва амалии кор, эътимоднокии натиҷаҳои бадастомада ва саҳми шахсии унвончӯ баён гардидааст.

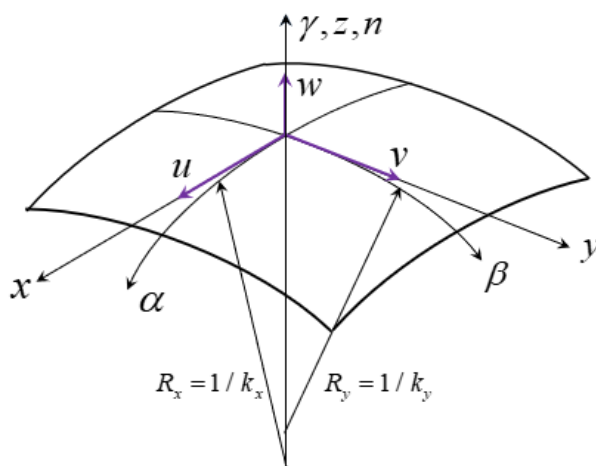
Дар боби якум «Баррасии таҳқиқот оид ба ҳисоб кардани қишрҳо аз таъсири динамикӣ» баррасии адабиёт оид ба усули ҳалли масъалаи

динамикии назарияи қишрҳо оварда шудааст. Таҳлили усулҳои омӯзиши лаппишҳои қишрҳо ҳангоми таъсири заминларза, бо назардошти таъсири конструксияҳои дастгиркунанда бар лаппишҳои қишрҳо, инчунин ҳалли методҳои ададӣ оварда шудааст. Боб аз чор бахш иборат буда, бо хулосаҳо хотима меёбад.

Боби дуюм «Ҳисоби қишри камфароз аз таъсири импульсивӣ бо методи фарқиятҳои охиринок» ба моделсозии масъалаҳои динамикии қишр бахшида шуда аз 6 бахш иборат аст. Боб бо хулосаҳо хотима меёбад.

2.1. Муодилаҳои асосӣ ва вобастагӣҳо. Қишри камфарозе бо қачии мусбати Гаусс (расми 1) дида баромада шудааст, ки барои он, мувофиқи назарияи техникӣ, муодилаҳои мавҷӣ ба намуди зерин ифода мешаванд

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - (k_x + \mu k_y) \frac{\partial w}{\partial x} - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - (k_y + \mu k_x) \frac{\partial w}{\partial y} - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{h^2}{12} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - (k_x + \mu k_y) \frac{\partial u}{\partial x} - (\mu k_x + k_y) \frac{\partial v}{\partial y} + \\ + (k_x^2 + k_y^2 + 2k_x k_y) w - \frac{1-\mu^2}{Eh} q + \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$



Расми 1. Геометрияи қишри камфароз

2.2. Моделсозии ададӣ. Бартарии усули фарқиятҳои охиринок дар он аст, ки имконияти ҳалли масъаларо бо ҳамагуна шартҳои сарҳадӣ ва геометрияи қишр медиҳад. Истифодабарии усули фарқиятҳои охиринок барои масъалаи динамикӣ ба он расонда мешавад, ки қадам ба қадам бо мурури вақт ва дар ҳар қадам пай дар пай ҳолати шиддатнокӣ - деформатсияҳои қишр бо назардошти тағйири

параметрҳои система, ки дар қадамҳои қаблӣ ба даст оварда шудаанд, муайян карда мешавад.

Муодилаҳои фарқиятӣ, ки муодилаҳои дифференциалиро аппроксиматсия мекунанд, метавонанд дар асоси схемаҳои ошкор ва ноошкор ба даст оварда шаванд. Схемаи ошкор имкон медиҳад, ки аз руи қиматҳои маълум дар қабатҳо ва симтур, қиматҳои функсияро дар қабати навбатӣ ҳисоб кардан мумкин аст. Схемаи ноошкор аз ин хосияти қулай маҳрум аст. Дар ин ҳолат, муодилаи тафовутиё, ки барои қиматҳои ба кайд гирифта шуда m ва n навишта шудааст, нисбат ба функсияи u_m^{n+1} ҳал карда наметавонад, яъне ин қиматро ба воситаи қиматҳои маълуми $u_{m+1}^n, u_m^n, u_{m-1}^n$ аз қабати қаблӣ ифода наметавонад кард. Дар ин муодила на танҳо қимати номаълуми u_m^{n+1} , балки қиматҳои номаълуми u_{m-1}^{n+1} ва u_{m+1}^{n+1} низ дохил мешаванд. Аз ин рӯ, барои муайян кардани u_m^{n+1} бояд муодилаи тафовутиро нисбат ба функсияи шабакаи u_m^{n+1} аргументи m ҳал кардан лозим меояд. Аз ин лиҳоз, дар ҳар қадам бояд системаи муодилаҳои алгебравии хаттиро ҳал кард.

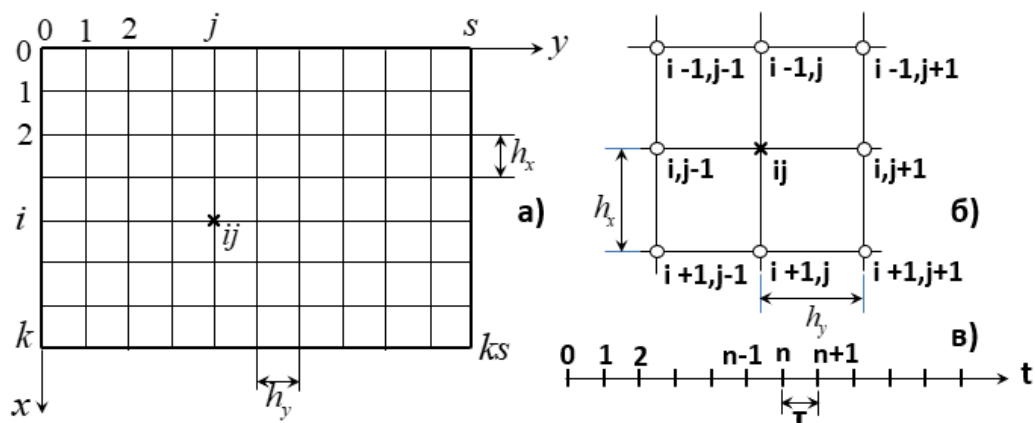
Бартарии ин схема дар он аст, ки шартҳои сусти устуворӣ дорад. Схемаи ноошкор, тавре ки дар масъалаҳои равандҳои гузариш нишон дода шудааст, аз нуқтаи назари иқтисодӣ ғайрибаҳо нест, зеро иҷрои он дар ҳар қадам 4-5 баробар вақти бештар талаб мекунад, аммо имкон медиҳад, ки қадам бо мурури вақт ба таври назаррас афзоиш ёбад. Аммо, ин фақат ба масъалаҳои динамикиё дахл дорад, ки бо раванди сусти боргузорӣ, ки дар он ҷабҳаҳои ошқори мавҷҳо ба вучуд намеояд, иҷро мешаванд. Дар масъалаҳои равандҳои гузариш, ки бо борҳои тезағйирёбанда ба вучуд омадаанд, маҳдудиятҳои, ки ба қадами вақт тайин карда мешаванд, талаботи дақиқӣ иҷозати ин корро намедиҳанд ва аз ин рӯ, барои онҳо схемаи ошкор ба мақсад мувофиқ аст.

Аз ин рӯ, дар поин барои аппроксиматсия кардани муодилаҳои дифференциалӣ схемаи тафовутии ошкорро истифода мебарем. Дар ҳудуди

$$0 \leq x \leq a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad t \geq 0$$

симтури яксонро (расми 2) дохил мекунем, ки бо нуқтаҳои буриши ҳамвориҳо ташкил шудааст.

$$x_i = ih_x, \quad y_j = jh_y, \quad t_n = n\tau, \quad (i, j, n = 0, 1, 2, \dots),$$



Расми 2. Симтури тафовутӣ

Барои функсияи $f_{ij}^n = f(x_i, y_j, t_n)$ аз тафовутҳои марказӣ, ба даст меорем

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= \frac{1}{h_x^2} (f_{i+1,j}^n - 2f_{ij}^n + f_{i-1,j}^n) + O(h^2); \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} &= \frac{1}{4h_x h_y} (f_{i+1,j+1}^n + f_{i-1,j-1}^n - f_{i-1,j+1}^n - f_{i+1,j-1}^n) + O(h^2); \\ \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{1}{2h_x} (f_{i+1,j}^n - f_{i-1,j}^n) + O(h^2); \\ \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} &= \frac{1}{h_x^4} (f_{i+2,j}^n - 4f_{i+1,j}^n + 6f_{ij}^n - 4f_{i-1,j}^n + f_{i-2,j}^n) + O(h^2); \\ \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} &= \frac{1}{\tau^2} (f_{ij}^{n+1} - 2f_{ij}^n + f_{ij}^{n-1}) + O(\tau^2)\end{aligned}\tag{2}$$

Аппроксиматсияи ҳосилаҳо дар (2) андозаи дақиқии дараҷаи дуум нисбат ба қадами h дорад.

2.3. Шартҳои сарҳадӣ ва ибтидоӣ. Дар ин бахш баъзе намудҳои шартҳои сарҳадӣ дида баромада шудаанд.

2.4. Таҳлили устувории ҳал ва интиҳоби қадам бо мурури вақт. Алгоритми ададӣ, ки дар асоси дискретӣ кардани масъалаи асосӣ ба даст оварда шудааст, бояд ба талаботе, ки ба устуворӣ, наздикшавӣ ва дақиқии ҳалҳо вобастаанд, мувофиқ бошад. Яке аз масъалаҳои муҳими ҳалли муодилаҳои тафовутӣ бо схемаи ошкор, ин таъмини устуворӣ мебошад.

2.5. Мисолҳои таҳлили устуворӣ дар ҳалли моделсозии ададӣ. Дар асоси алгоритми овардашуда барномаи компютерӣ коркард шудааст, ки бо ёрии

он натиҷаҳои лаппишҳои қишри камфароз аз таъсири бори муваққатӣ ва импульсивӣ ба даст оварда шудаанд.

Ҷадвали 1. - Таҳқиқи устуворӣ дар муодилаҳои тафовутӣ

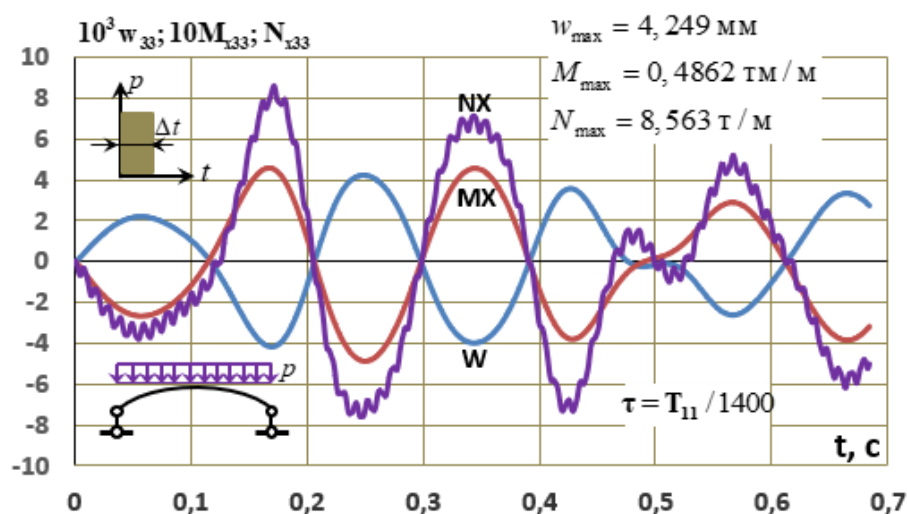
Хамшавӣ ва қувва	Қимати қадам аз рӯи вақти τ						
	$T_{11} / 200$	$T_{11} / 400$	$T_{11} / 600$	$T_{11} / 800$	$T_{11} / 1000$	$T_{11} / 1200$	$T_{11} / 1400$
$w, \text{мм}$	5,124	4,613	4,441	4,358	4,307	4,271	4,249
$N_x, \text{т/м}$	10,160	9,250	8,887	8,774	8,682	8,568	8,563
$M_x, \text{тм/м}$	-0,586	-0,527	-0,507	-0,498	-0,493	-0,488	-0,486

Аз муқоисаи натиҷаҳои ба даст омада дар қиматҳои гуногуни қадам аз рӯи вақт ва қадами доимии координатаҳои фазоӣ чунин бармеояд

1. Ҳангоми коҳиши қадам аз рӯи вақт ҳалли устувории муодилаҳои тафовутӣ бо схемаи ошкор таъмин карда мешавад.

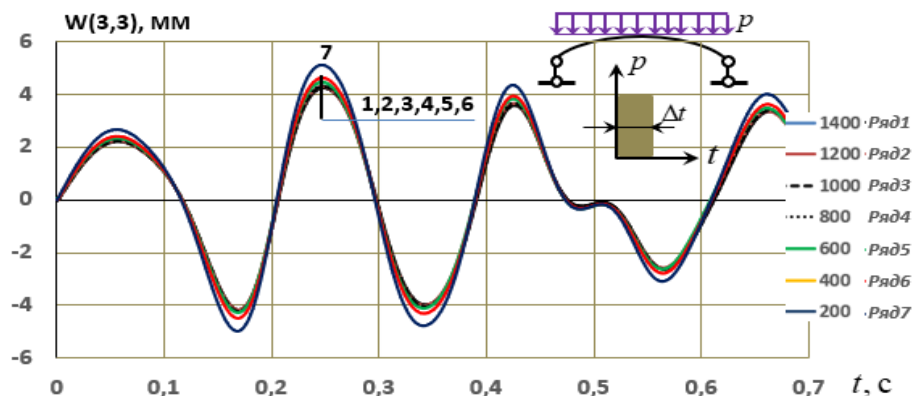
2. Наздикшавии ҳалли натиҷаҳо мушоҳида мешавад.

Дар расми 3 графикҳои тағйирёбии хамшавӣ оварда шудаанд.



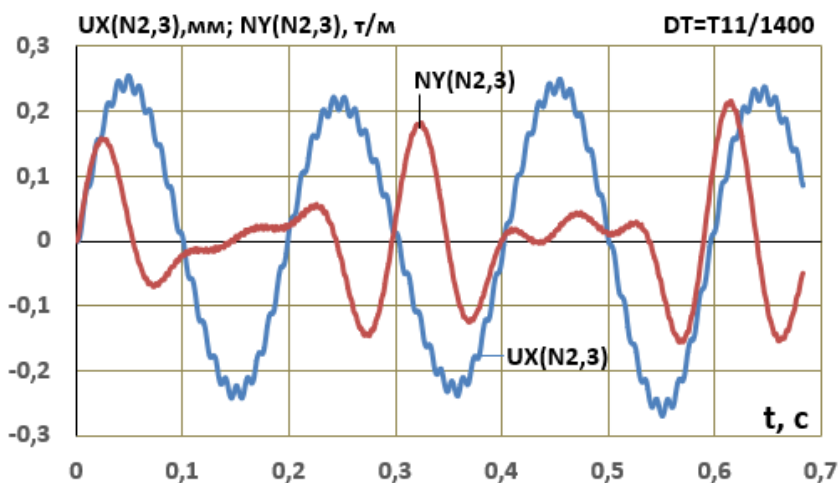
Расми 3. Тағйирёбии хамшавӣ, моменти ҳамкунанда ва қувваи нормалӣ дар маркази қишр бо мурури вақт

Дар расми 4 графикҳои тағйирёбии хамшавӣ дар маркази қишр, ки бо ҳафт қиматҳои гуногуни қадам аз рӯи вақт ба даст оварда шудаанд, пешниҳод шудааст.



Расми 4. Тағйирёбии хамшавӣ дар маркази қишр бо контури ба намуди диафрагмаи идеалӣ, бо қадамҳои гуногун аз руи вақт

Барои муқоиса дар расми 5 графикҳои тағйирёбии ҷойивазкунии уфуқӣ ва қувваҳои нормалӣ дар миёнаи канори қишр оварда шудааст.



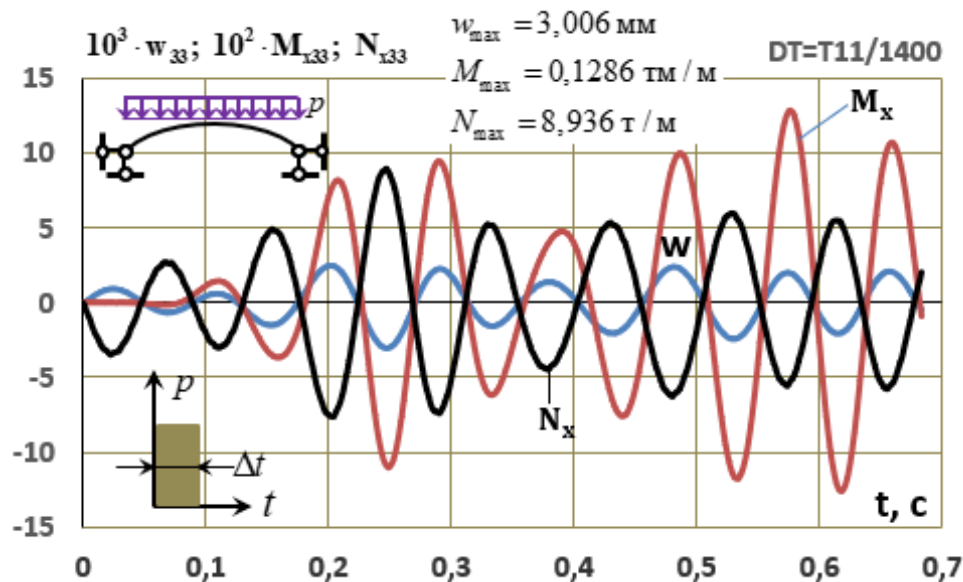
Расми 5. Ҷойивазкунии уфуқӣ ва қувваҳои нормалӣ

2.6. Натиҷаҳои ҳисоби динамикии қишр бо шартҳои гуногуни канорӣ. Дар ин ҷо натиҷаҳои моделсозии ададӣ барои қишр бо таъйи бандқдори беҳаракат аз таъсири бори муваққатии тақсимшудаи баробар ба шиддати $q = 0,5 \text{ т/м}^2$ ва давомнокии $\Delta t = 0,00217 \text{ с}$ ба даст оварда шудаанд. Дар асоси алгоритми коркард шуда барномаи компютерӣ таҳия шуда, натиҷаҳо дар тақсими гуногун ба координатаҳои фазоӣ ва вақт ба даст оварда шудаанд. Дар ин ҷо, инчунин таҳкикот оиди устуворӣ ва наздикшавии ҳалли муодилаҳои тафовутӣ гузаронида шудааст. Дар ҷадвали 2 натиҷаҳои моделсозии ададӣ дар симтури 10×10 дар қадамҳои гуногуни вақт оварда шудаанд. Мусаллам аст, ки бо коҳиши қадам аз рӯи вақт, яъне бо афзоиши шумораи тақсимотҳо NT , хатогиҳо коҳиш ёфта, ба сифр мерасанд.

Ҷадвали 2. - Қиматҳои максималии ҳамшавӣ, моменти ҳамкунанда ва қувваҳои нормалӣ дар маркази қишр аз таъсири бори муваққатӣ

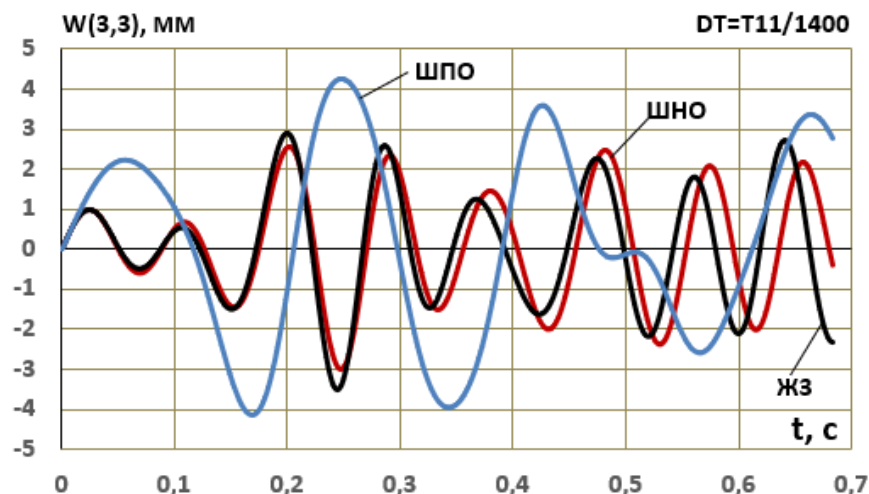
NT	$f_{\text{макс}}$ (м)	хатогӣ, %	$M_{\text{макс}}$ (тм/м)	хатогӣ, %	$N_{\text{макс}}$ (т/м)	хатогӣ, %
200	3,626	-	15,52	-	10,77	-
400	3,264	11,09	13,96	11,17	9,703	10,99
600	3,143	3,85	13,44	3,86	9,346	3,82
800	3,083	1,95	13,19	1,89	9,165	1,97
1000	3,046	1,21	13,04	1,15	9,06	1,16
1200	3,022	0,79	12,93	0,85	8,98	0,89
1400	3,006	0,53	12,86	0,54	8,936	0,49

Графикҳои тағйирёбии ҳамшавӣ, моменти ҳамкунанда ва қувваҳои нормалӣ дар маркази қишр дар расми 6 оварда шудаанд.



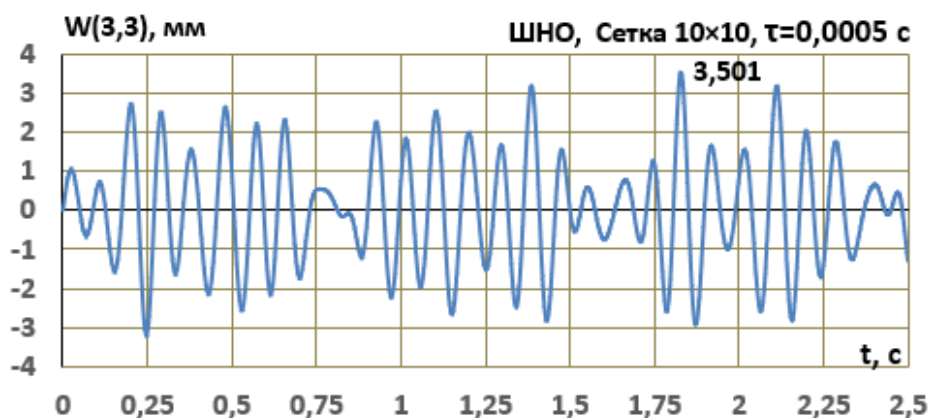
Расми 6. Ҳамшавӣ ва қувваҳои дохилӣ дар маркази қишр

Даври лаппишҳои қишр бо саҳтии мазбӯтӣ то андозае нисбат ба таъйи бандаки беҳаракат коҳиш меёбад, ва амплитудаҳои лаппишҳои онҳо тақрибан якхела мебошанд. Дар расми 7 натиҷаи ҳисоби қишр бо таъйи бандаки беҳаракат оварда шудааст.

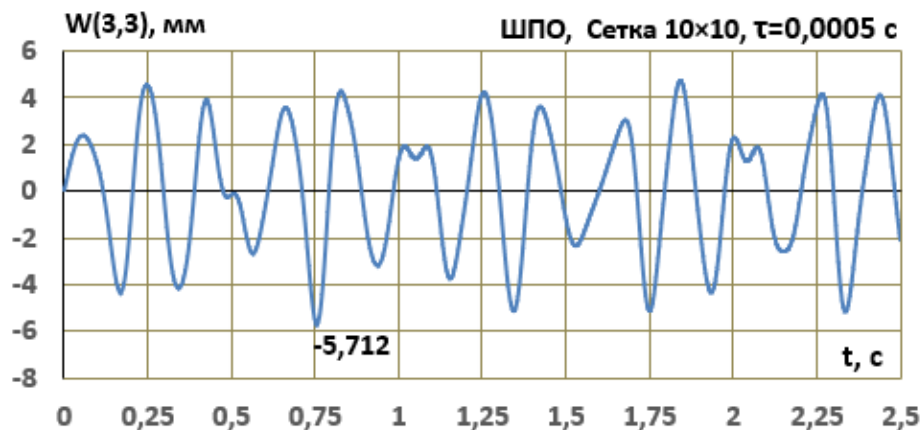


Расми 7. Муқоисаи натиҷаҳо

Дар расмҳои 8 ва 9 графикҳои тағйирёбии ҳамшавӣ дар маркази қишр мутаносибан бо банди беҳаракат (ББ) ва банди ҳаракатнок (БХ) нишон дода шудаанд. Муқоиса нишон медиҳад, ки равандҳои лаппишӣ ҳам аз ҷиҳати амплитудӣ ва ҳам аз ҷиҳати зуддихо фарқ мекунанд.



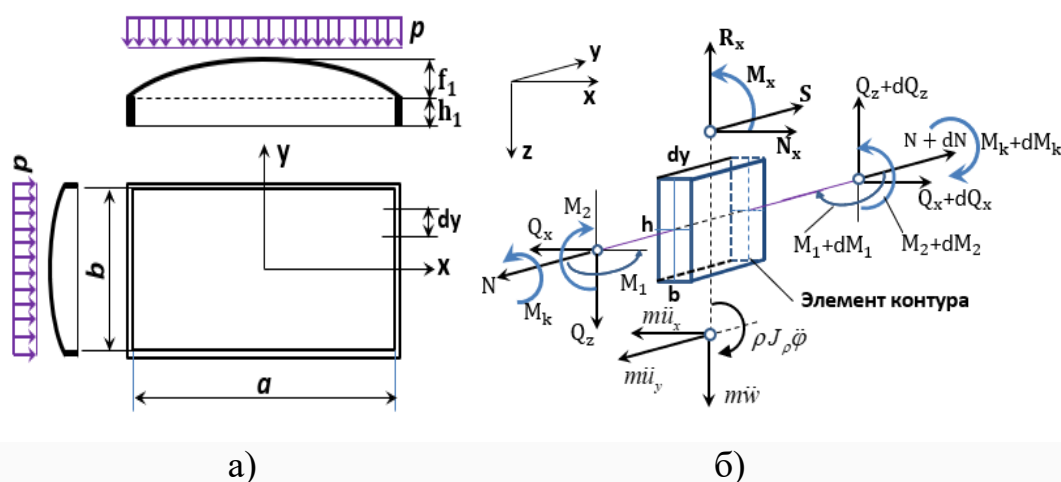
Расми 8. Лаппишҳои маркази қишр ҳангоми ББ



Расми 9. Лаппишҳои маркази қишр ҳангоми БХ

Дар боби сеюм «Ҳисоби қишр дар якҷоягӣ бо унсурҳои канорӣ ҳангоми таъсири импульсивӣ» таъсири деформатсияшавии унсурҳои канорӣ ба ҳолати шиддатнокӣ-деформатсияонии қишри камфароз дида баромада мешавад. Боб аз 5 бахш иборат буда, бо хулосаҳо хотима меёбад.

3.1. Муодилаҳои динамикии унсури канорӣ. Ҳисоб кардани қишр бо назардошти деформатсияи унсури канорӣ, яке аз масъалаҳои мураккаби механикаи сохмонӣ мебошад. Муодилаҳои динамикии мувозинатиро метавон аз дидабароии бевоситаи унсури канорӣ (расми 10) ба даст овард. Шарти мувозинати унсур имкон медиҳад, ки вобастагҳои дифференсиалии байни борҳои беруна, ки аз қишр интиқол дода мешаванд ва қувваҳои дохилӣ дар бурришҳои кундалангии болори канорӣ ба даст оварда шаванд. Қувваҳо ба меҳварҳои мувофиқи координатаҳо проексия гирифта суммаи моментҳоро нисбат ба тир тартиб дода (расми 10, б), ҳосил мекунем.



Расми 10. Барои муодилаҳои ҳаракати болори канорӣ: а-қишри камфароз; б-қуввахое, ки бар унсури канор таъсир мекунанд

$$\begin{aligned}
 \sum y = 0; \quad & \frac{\partial N}{\partial y} + S - \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0; \\
 \sum x = 0; \quad & \frac{\partial Q_x}{\partial y} + N_x - \bar{m} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0; \\
 \sum z = 0; \quad & \frac{\partial Q_z}{\partial y} - R_x - \bar{m} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0; \\
 \sum m_y = 0; \quad & \frac{\partial M_k}{\partial y} - M_x - \rho J_p \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0;
 \end{aligned} \tag{3}$$

дар ин ҷо N, Q_x, Q_z, M_k – қувваҳо ва моментҳои чархзанандае, ки дар буришҳои

болори канорӣ ба вучуд меоянд

$$N = EF_y \varepsilon_y; \quad Q_x = \frac{\partial M_1}{\partial y}; \quad Q_z = \frac{\partial M_z}{\partial y}; \quad M_k = GJ_p \theta,$$

дар ин ҷо M_1, M_2 – моментҳои ҳамкунанда;

ε_y – деформатсияи нисбӣ;

$\theta = d\varphi / dy$ – кунҷи нисбии пайчешиш;

φ – кунҷи пайчешиш.

Бо истифода аз муодилаи дифференсиалии ҳамаи болор меёбем, ки

$$M_1 = -(EJ_x)_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \quad M_2 = -(EJ_z)_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

Қувваҳо ва момент (S, N_x, R_x, M_x), ки аз қишр ба канори контурӣ интиқол дода мешаванд бо формулаи зерин муайян карда мешаванд

$$\begin{aligned} S &= \frac{Eh}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad N_x = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial y} - w(k_x + \mu k_y) \right], \\ R_x &= D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right]; \quad M_x = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

3.2. Аппроксиматсияи тафвоти муодилаи унсури канорӣ. Масъалаи аппроксиматсияи тафвоти барои муодилаҳои динамикии унсури канорӣ яке аз масъалаҳои асосӣ дар ҳалли проблемаи пешниҳодшуда мебошад. Аппроксиматсиякунонии (3) ва (4) дар тафвоти охирик, мо формулаҳои барои муайян кардани ҷойивазкуниҳо ва кунҷҳои гардиш дар гиреҳои симтур дар хати контур ба даст меорем. Бо мақсади хориҷи ҷойивазкуниҳои беруна аз контур ҳангоми аппроксиматсияи муодилаҳо барои канор аз тафвоти якҷониба (чапӣ) дар ҳосилаҳои функсияҳо нисбат ба x ва барои канор дар ҳосилаҳо нисбат ба меҳвари $y = b/2$ истифода мебарем.

3.3. Лаппишҳои қишр бо назардошти инертсияи унсури канорӣ. Қишре дида баромада мешавад, ки бо бори импулсивии тақсимшудаи баробар боргузори шудааст. Унсурҳои канории қишр метавонанд ҳам дар самтҳои тӯлӣ ва амудӣ лаппиш хурда, инчунин тобиш ёбанд.

Лаппишҳои тӯлии унсури канорӣ. Фарз карда мешавад, ки унсури канорӣ фақат дар самти тӯлӣ лаппиш меҳурад (расми 11, а). Қувваҳои бар

меҳвари тулии болор проексия гирифта, муодилаҳои мувофиқи мувозинатиро барои қанорҳои $x = a/2$ ва $y = b/2$ ба намуди зерин ба даст меорем

$$\begin{aligned} E_k F_k \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + S_1 - \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\ E_k F_k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + S_2 - \bar{m} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

дар ин ҷо

$$S_1 = \frac{Eh}{2(1+\mu)} \frac{\partial v}{\partial x}; \quad S_2 = \frac{Eh}{2(1+\mu)} \frac{\partial u}{\partial y}.$$

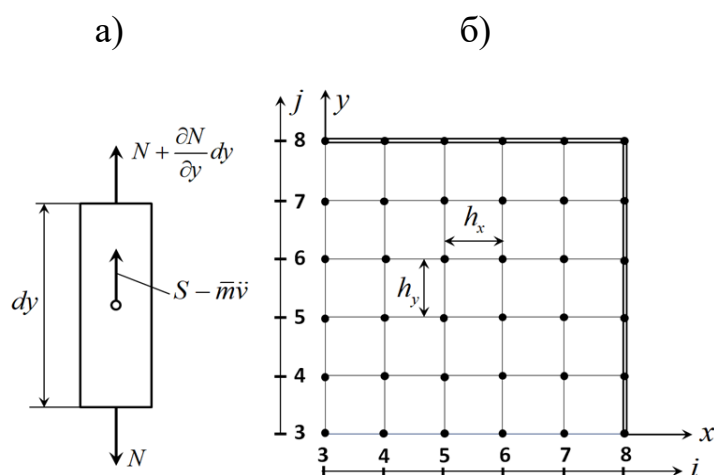
дар ин сурат дар қанорҳои қишр шартҳои зерин иҷро мешаванд.

$$u = w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0; \quad v = w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

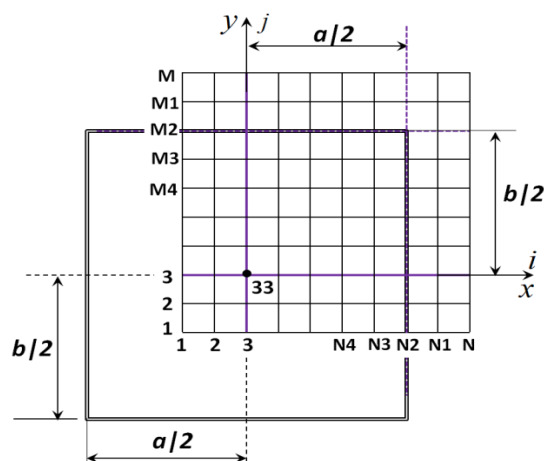
Ба назар гирифта мешавад, ки нуқтаҳои кунҷӣ беҳаракат ва унсурҳои қанорӣ мазбутӣ ба ҳам пайвастанд, навиштан мумкин аст.

$$u = v = w = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = 0.$$

Барномаи компютерӣ дар забони Фортран коркард шудааст ва натиҷаҳои моделсозии ададӣ бо истифода аз симтуре, ки дар расми 12 оварда шудааст, ба даст оварда шудаанд. Чунонки ҳисобҳо нишон доданд, лаппишҳои ҳамаи нуқтаҳои унсури қанорӣ дар як фаз бо амплитудайи максималӣ дар нуқтаи (8,5) (расми 11, б) рух медиҳанд.

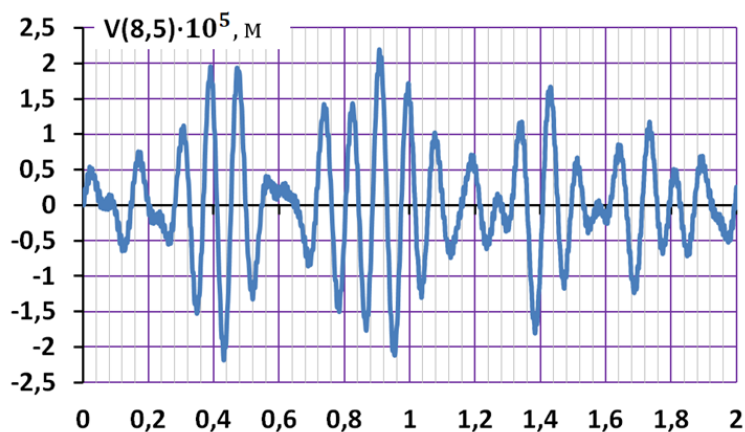


Расми 11. Барои муодилаҳои лаппишҳои тулии унсури қанорӣ



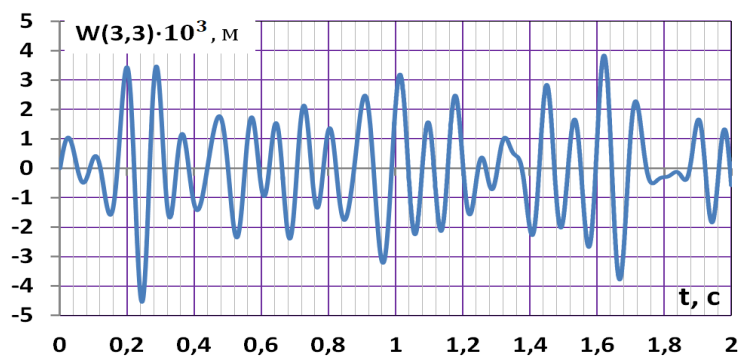
Расми 12. Симтури тафовутӣ барои чоряки қишр

Дар расми 13 графика тағйирёбии ҷойивазкунии тулии нуктаи N2,5 оварда шудааст.



Расми 13. Лаппишҳои тулии унсури контурӣ

Лаппишҳои тулии нуктаи контурии N2,5, тавре, ки аз расми 13 дида мешавад, хусусияти мураккаби тағйирёбӣ доранд, ҳамчунон ки лаппишҳои амудии маркази қишр (расми 14).



Расми 14. Лаппишҳои амудии маркази қишр

Дар ҳамин бахш, инчунин лаппишҳои амудии унсури канорӣ дар ҳамвории амудӣ, лаппишҳои амудии унсури канорӣ берун аз ҳамворӣ ва лаппишҳои чархзанандаи унсури канорӣ дида баромада шудаанд.

3.4. Лаппишҳои қишр бо назардошти кори фазоии унсури канорӣ. Харакатҳои хамиш-тулии унсурҳои канорӣ дар фазо бе чархзани дида баромада шудааст. Дар ин ҳолат, муодилаҳои мувозинатӣ барои канор ба намуди зерин ифода мешаванд

$$\begin{aligned} E_k F_k \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - k_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{Eh}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\ E_k J_x \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} + \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial y} - w(k_x + \mu k_y) \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ E_k J_z \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

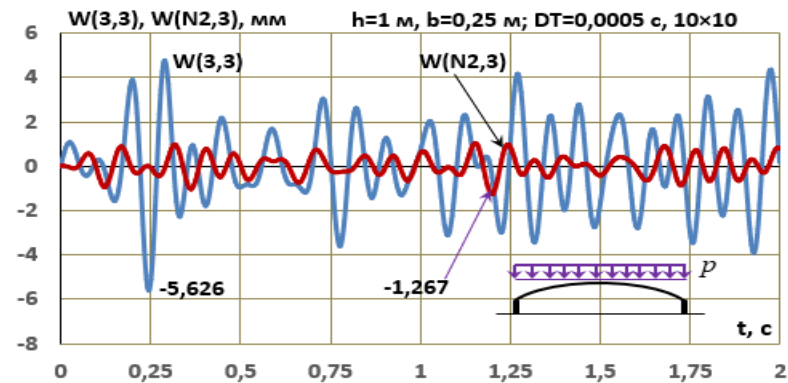
ва барои канор мутаносибан ба намуди зерин навишта мешаванд

$$\begin{aligned} E_k F_k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - k_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{Eh}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \bar{m} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ E_k J_y \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{Eh}{1-m^2} \left[\frac{\partial v}{\partial y} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} - w(k_y + \mu k_x) \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\ E_k J_z \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

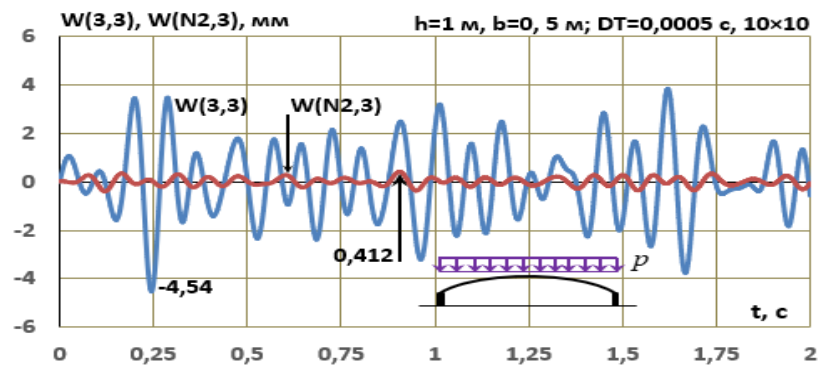
Дар ин бахш, инчунин лаппиши хамиш-чархзанӣ унсурҳои канорӣ қишр дида баромада шудаанд.

3.5. Мисолҳои ҳисоб кардани қишри камфароз бо назардошти кори унсурҳои канорӣ. Дар ин ҷо таҳқиқи лаппиши қишр бо назардошти деформатсияҳои унсурҳои канорӣ гузаронида шудааст. Қишрҳое, ки ҳамчун болопуш истифода мешаванд, аксаран унсурҳои канорӣ доранд. Моделсозӣ кардани масъалаи динамикии қишр бо назардошти деформатсияи унсури канорӣ яке аз масъалаҳои мураккаби механикаи сохмонӣ ба шумор меравад. Фарз карда мешавад, ки қишри камфароз бо болорҳои канорӣ ба тавре пайваست мешавад, ки ин пайванд бо ҷор қувваи номаълумӣ R_x, N_x, S, M_x ифода карда мешавад.

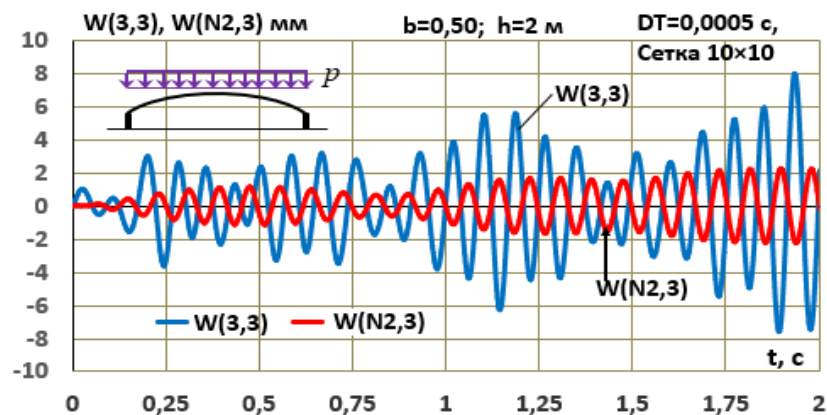
Барномаи компютерӣ коркард шуда ва натиҷаҳои ҳисоби қишр бо назардошти лаппишҳои ҳамиш - тулии унсури канорӣ ба даст оварда шудаанд. Дар расмҳои 15 - 17 графикҳои лаппишҳои амудии марказ ва миёнаи канори қишри мураббаъ бо қиматҳои гуногуни андозаҳои буриши кундалангии унсури канорӣ нишон дода шудаанд.



Расми 15. Лаппишҳои қишр хангоми $b = 0.25$, $h = 1$ м.

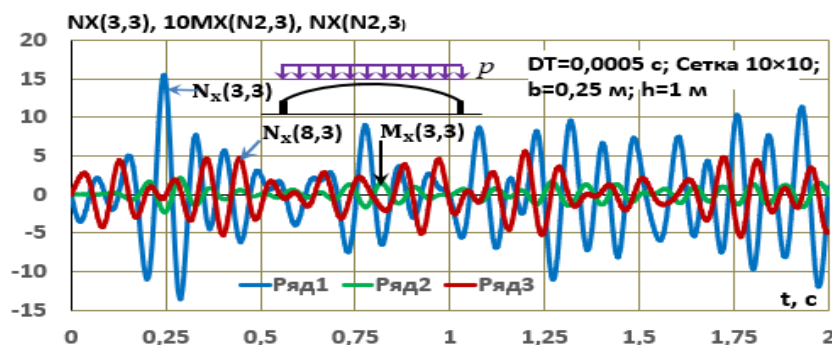


Расми 16. Лаппишҳои қишр хангоми $b = 0.50$, $h = 1$ м.



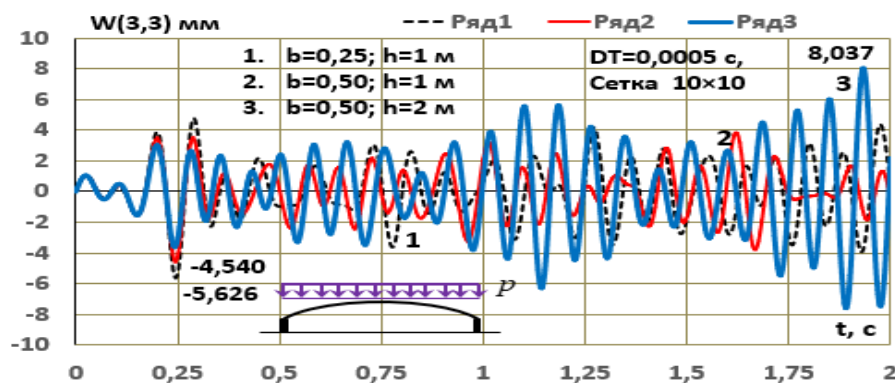
Расми 17. Лаппишҳои қишр хангоми $h = 2$, $b = 0.50$ м.

Дар расми 18 графикҳои тағйирёбии қувваи нормалӣ ва моменти каткунанда дар маркази қишр, инчунин қувваи нормалӣ дар миёнаи контур оварда шудаанд.



Расми 18. Қувваҳои нормалӣ ва моменти каткунанда хангоми $b = 0,50$, $h = 1$ м.

Дар расми 19 графикҳои тағйирёбии ҷойивазкунӣ дар маркази қишр бо қиматҳои гуногуни андозаи буриши кундалангии унсури канорӣ оварда шудаанд.



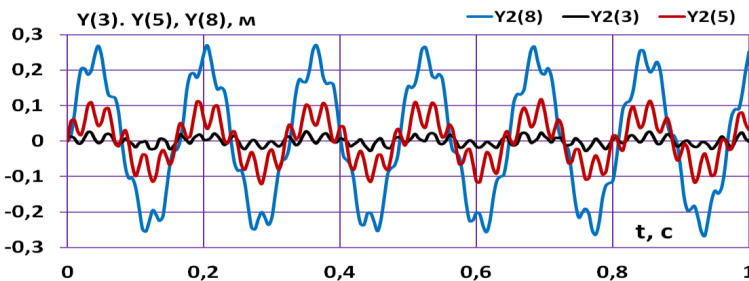
Расми 19. Лаппишҳои маркази қишр бо назардошти лаппишҳои хамиш-тулии унсури канорӣ

Боби чорум. «Кори муштаракӣ қишр бо унсурҳои канорӣ ва конструкцияҳои дастгиркунанда» оиди ҳисоби кори фазоии қишр бо шартҳои гуногуни канорӣ бахшида шудааст. Боб аз 4 бахш иборат буда, бо хулосаҳо хотима меёбад.

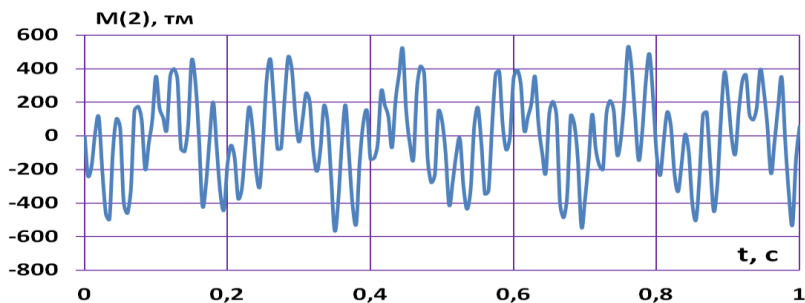
4.1. Қишр бо таъягоҳҳои чандринармӣ дошта. Дар ин ҷо масъалае дида барома мешавад, ки қишр бо унсурҳои чандринии канорӣ дар кунҷҳо ба таъягоҳҳои чандринармӣ дошта дар ҳамвории уфуқӣ таъя кардааст ва ба таъсири бори уфуқии импулсивӣ тақсимшуда, ки ба канорҳо гузошта шудааст, дучор меояд. Бори беруни ба меҳварҳои унсурҳои канорӣ, ки бо сатҳи миёнаи қишр мувофиқат мекунанд, гузошта мешавад. Алоқаҳои таъягоҳӣ дар кунҷҳо дар қисмати поёнии унсури канорӣ ҷойгир шудаанд ва эксцентриситети e доранд. Бор $q(t)$ дар фосилаи вақти Δt ($\Delta t \leq 1/100$ даври лаппиш аст) амал мекунад, пас аз он

лаппишҳои озои система оғоз ёфта, ба хоѝри деформатсияпазирии унсурҳои канорӣ, нуқтаҳои кунҷӣ ҷойиваз мешаванд.

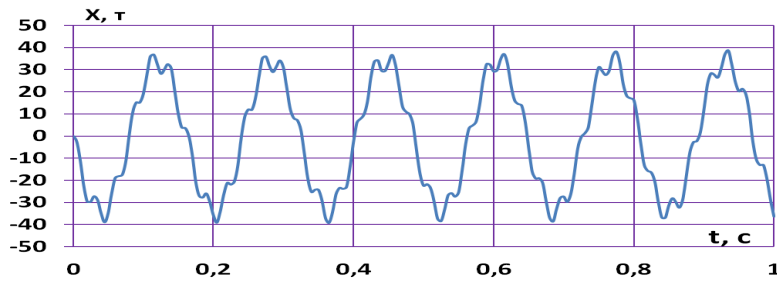
4.2. Аксуламали системаҳо «тир - унсури канорӣ - қишр». Дар ин ҷо қишр бо унсурҳои чандрии канории дар кунҷҳо ба сутунҳо таъя кардааст, ки қисмҳои таъягоҳии онҳо ба таъсири берунии симметрии дучор меоянд. Моҳияти физикии масъала дар он аст, ки таъсири берунӣ тирро ба ҳаракат меорад ва дар пайвастиҳои бо қишр қувваҳои ба вучуд меоянд, ки худ унсури канорӣ ва ба ин восита қишрро деформатсия медиҳанд. Дар таъягоҳи бандакдор, агар фикр кунем, ки тир дар самти тулӣ ҳаракат намекунад, дар ҳар кунҷ ду қувва ба вучуд меояд. Ба хоҳири симметрии метавон фақат $1/4$ қисми қишр ва як тирро дида баромад. Аввалан, ба ин фикр буда, ки қувваҳои $x(t)$ ва $y(t)$ маълуманд, ҳисоб кардани қишр бо унсурҳои канорӣ дида мешавад. Бо алгоритми пешниҳодшуда барномаи компютерӣ коркард шудааст ва натиҷаҳои моделсозии адабии масъалаи динамикӣ ба даст оварда шудаанд. Дар расмҳои 20-21 натиҷаҳои ҳисоби сутун оварда шудаанд. Графики тағйирёбии қувваи мутақобила байни сутун ва қишр дар расми 22 нишон дода шудааст.



Расми 20. Чойивазкунии сутун бо назардошти таъсири қувваҳои фишуриш аз вазни қишр



Расми 21. Моменти хамкунанда дар қисми таъағоҳии сутун



Расми 22. Қувваи мутамаркази мутақобила байни қишр ва сутунҳо аз ҷойивазкунии ибтидоии додашуда

4.3. Ҳаракати чархзананда-хатии диски қишр бо таъягоҳҳои чандрӣ. Бо мақсади омӯзиши ҳаракати чархзананда-хатии қишр модели динамикии дида баромада шудааст. Дар ин ҷо тирҳои таъягоҳӣ бо таъягоҳҳои чандринармӣ бо коэффитсиентҳои мувофиқ дар меҳварҳои x ва y иваз карда шудаанд. Дар ин ҳолат, тирҳоро бевазн ҳисобида, моментҳои нозизи чархзананда дар онҳо ба вуҷуд меоянд, ки метавон онҳоро ба ҳисоб нагирифт. Илова бар ин, тирҳо дар самти тулӣ деформатсия намеёбанд. Муодилаҳои ҳаракати диск бо се дараҷаи озод ба намуди зерин ифода мешаванд.

$$\begin{aligned} \sum x &= m\ddot{u} - R_{1x} - R_x + R_{3x} + R_{4x} - P_x = 0, \\ \sum y &= m\ddot{v} - R_{1y} - R_{2y} + R_{3y} + R_{4y} - P_y = 0, \\ \sum M &= mi^2\ddot{\alpha} - \frac{b}{2}(-R_{1x} + R_{2x} - R_{3x} + R_{4x}) - \\ &\quad - \frac{a}{2}(R_{1y} - R_{2y} + R_{3y} - R_{4y}) + P_x \frac{b}{2} - P_y \frac{a}{2} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

Ҷойивазкунии нуқтаҳои кунҷӣ ба воситаи ҷойивазкунии маркази масса ва вобастагҳои зерин ифода мешаванд

$$\begin{aligned} u_1 &= u - \frac{b\alpha}{2} - \frac{a\alpha^2}{4}, & v_1 &= v + \frac{a\alpha}{2} + \frac{b\alpha^2}{4}, \\ u_2 &= u + \frac{b\alpha}{2} + \frac{a\alpha^2}{4}, & v_2 &= v + \frac{a\alpha}{2} - \frac{b\alpha^2}{4}, \\ u_3 &= u + \frac{b\alpha}{2} - \frac{a\alpha^2}{2}, & v_3 &= v - \frac{a\alpha}{2} - \frac{b\alpha^2}{2}, \\ u_4 &= u - \frac{b\alpha}{2} - \frac{a\alpha^2}{2}, & v_4 &= v - \frac{a\alpha}{2} + \frac{b\alpha^2}{4}. \end{aligned} \quad (10)$$

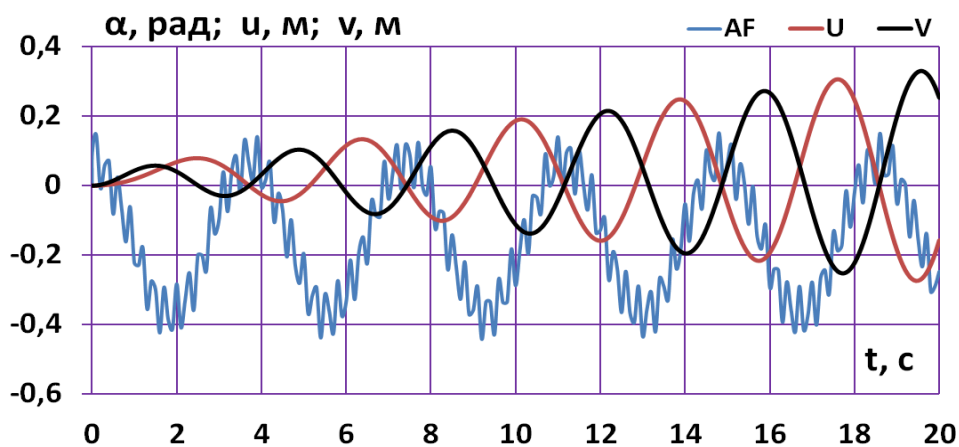
Бо гузоштани (10) ба (9) меёбем

$$\begin{aligned}
m \ddot{u} &= -uc_{1x} + \frac{b\alpha}{2}c_{2x} - \frac{a\alpha^2}{4}c_{3x} + P_x, \\
m \ddot{v} &= -vc_{1y} + \frac{a\alpha}{2}c_{2y} - \frac{b\alpha^2}{4}c_{3y} + P_y, \\
m i^2 \ddot{\alpha} &= uc_{1x} \frac{b}{2} + vc_{1y} \frac{a}{2} - \frac{b^2\alpha}{4}c_{1x} - \frac{a^2\alpha}{4}c_{1y} + \\
&+ \frac{ab\alpha^2}{8}c_{xy} + P_y \frac{a}{2} - P_x \frac{b}{2}.
\end{aligned} \tag{11}$$

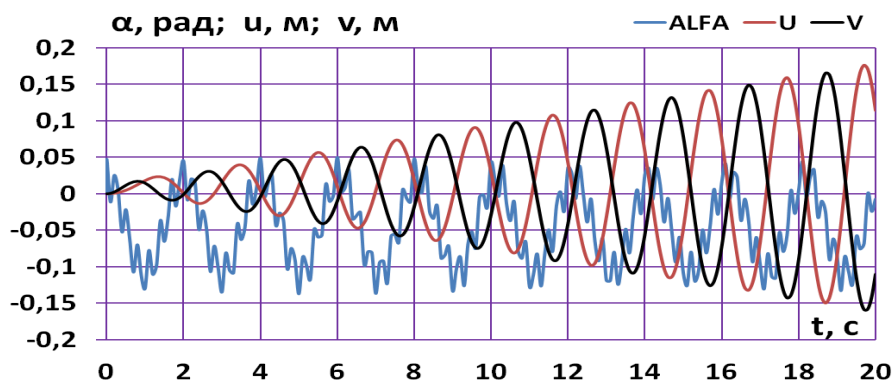
Аз аппроксиматсияи (11) меёбем

$$\begin{aligned}
u^{n+1} &= \left(2 - c_{1x} \frac{\tau^2}{m}\right) u^n + c_{2x} \frac{b\tau^2}{2m} \alpha^n - c_{3x} \frac{a\tau^2}{4m} (\alpha^2)^n + \frac{\tau^2}{m} P_x - u^{n-1}, \\
v^{n+1} &= \left(2 - c_{1y} \frac{\tau^2}{m}\right) v^n + c_{2y} \frac{a\tau^2}{2m} \alpha^n - c_{3y} \frac{b\tau^2}{4m} (\alpha^2)^n + \frac{\tau^2}{m} P_y - v^{n-1}, \\
\alpha^{n+1} &= \frac{c_{1x}b}{2mi^2} u^n + \frac{c_{1x}a}{2mi^2} v^n + \left(2 - \frac{c_{1x}b^2}{4mi^2} - \frac{c_{1y}a^2}{4mi^2}\right) \alpha^n + \\
&+ \frac{abc_{xy}}{8mi^2} (\alpha^2)^n + P_y \frac{a}{2mi^2} - P_x \frac{b}{2mi^2} - \alpha^{n-1}.
\end{aligned} \tag{12}$$

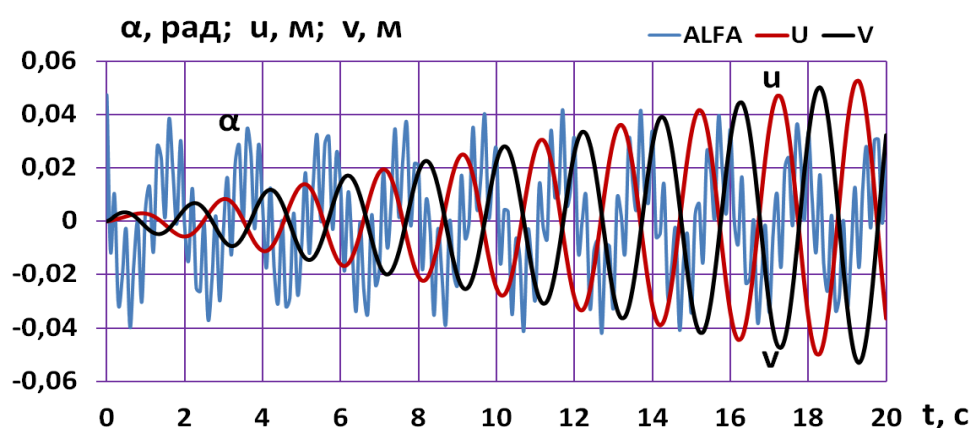
Ҳангоми ду баробар зиёд намудани бурриши кундалангӣ тирҳо амплитуда ва даври лаппиши ҳаракатҳои хатгӣ 4 баробар коҳиш меёбанд. Дар ҳолате, ки қувваҳо баробар ҳастанд ин фақат ба ҳаракати хатии система мувофиқ аст. Дар расмҳои 23-25 натиҷаи ҳисоби система оварда шудааст.



Расми 23. Ҳаракати чархзанӣ-хатии диски қишр хангоми $H=12\text{м}$.



Расми 24. Ҳаракати чарзанӣ-хатии диски қишр хангоми таъсири бори дарозмуддат



Расми 25. Ҳаракати чарзанӣ-хатии диски қишр хангоми таъсири бори кутохмуддат

Баъд ҳолате дида баромада мешавад, ки таъсири берунӣ ба қисми таъягоҳии сутун гузошта мешавад ва вазни онро бояд ба назар гирифт. Тавре ки дар боло қайд карда шуд, фарз мекунем, ки таъсири берунӣ фақат ба яке аз таъягоҳҳо гузошта мешавад. Таъягоҳҳои дигар дар ин ҳолат ором ҳастанд ва амали тирҳои мувофиқ ба таъягоҳҳои чандрӣ иваз карда мешаванд. Бо ҳамин роҳ модели ҳисобии ба дастомада имкон медиҳад, ки масъала бо назардошти лаппиши арзии сутун ҳал карда шавад.

4.4. Муқоисаи натиҷаҳои ба даст омада дар асоси усули пешниҳодшуда бо натиҷаҳои ҳалли дақиқ. Бо мақсади санҷиши эътимоднокии натиҷаҳои ба даст омада дар асоси усули коркардшуда, муқоисаҳо бо ҳалли маълум анҷом дода шуданд. Барои ин, аввал лаппишҳои арзии болор бо массаи якхелаи тақсимшуда ва пайвандҳои гуногун дида баромада шуданд.

Ба сифати мисол, болори дарозии 6 м, бо буриши кундалангии 0,5x0,5 м, модули чандрӣ E ва массаи m дида баромада шудааст.

$$E = 2 \cdot 10^6 \text{ Т/м}^2 \quad m = (\gamma/g)F = 0,045 \text{ тс}^2/\text{м}^4$$

Барои болоре, ки як нути озод дорад, зудии шакли асосӣ баробар аст ба

$$\omega = 45,70 \text{ с}^{-1} (f = 7,28 \text{ Гц}).$$

Барои тири дуҷум аз формулаи оиди муайян кардани зудии лаппишҳои озод меёбем, ки $\omega_1 = 205,36 \text{ с}^{-1}$ ва $f_1 = 32,00 \text{ Гц}$. Дар ин ҳолат, беш аз 4 баробар нисбат ба ҳолати аввалаи пайвандкунӣ, зудӣ афзоиш меёбад.

Акнун ба натиҷаҳои ба даст омадаи дар асоси ҳалли адабии муодилаи дифференсиалии ҳаракати арзии болор бо алгоритми пешниҳодшуда дар банди 4.2 диссертатсия рӯ меорем. Ҳисоб барои симтури бо қадами 1м ва қадам аз рӯи вақт $\tau = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ гузаронида шуданд. Зудии лаппиш барои болори консолӣ $f = 7,31 \text{ Гц}$, барои болори дуҷум $f = 30,6 \text{ Гц}$ аст. Хатогии нисбӣ барои болори якҷум 0,4%, барои болори дуҷум 4,2% ташкил медиҳад.

Илова бар ин, системае, ки як дараҷаи озод дорад дида баромада шудааст, ки ҳаракати он, бе дарназардошти хомушкунӣ, бо муодилаи дифференсиалии зерин ифода карда мешавад

$$m\ddot{y} + ky = 0 \text{ или } \ddot{y} + \omega^2 y = 0, \quad (13)$$

дар ин ҷо $\omega = \sqrt{k/m}$ – зудии лаппиши озод.

Ҳалли (13) ҳангоми $k=1$, $m=1$, ба лаппиши гармоникӣ бо даври лаппиш $T = 6,28 \text{ с}$ ва зудии

$$\omega = 1 \text{ с}^{-1}, \quad f = 0,159 \text{ Гц}$$
 оварда мерасонад.

Ин мисолро бо методи фарқиятҳои охиринок ҳал намуда аз аппроксиматсияи (13) меёбем

$$y^{n+1} = \left(2 - \frac{k^2}{m} \tau^2 \right) y^n - y^{n-1} + P \frac{\tau^2}{m}, \quad (14)$$

дар ин ҷо P – таъсири импульсивӣ;

τ – қадам аз рӯи вақт.

Бигузор $P = 10 \text{ т}$ ва дар фосилаи $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ $k=1$, $m=1$, $\tau = 0,1 \text{ с}$. таъсир кунад. Он гоҳ мувофиқи (14) қонуни тағйирёбииро, ки дар расми 23 оварда шудааст, ба даст меорем. Тавре, ки аз расми 23 дида мешавад, ҳангоми $k=1$, $f=0,16 \text{ Гц}$, ба даст меорем, ки ин 0,6% аз қимати дақиқ фарқ мекунад. Ҳангоми қимати $k=2$ амплитуда коҳиш ёфта, зудӣ то $f=0,22 \text{ Гц}$ афзоиш меёбад.

ХУЛОСАИ УМУМӢ

1. Рафтори динамикии қишри тунуки камфарози чандрӣ, ки дар тарҳ мураббаъ аст, хангоми таъсири импулсивии якхелаи таксимшуда омӯзиш ёфт. Дар асоси озмоишҳои ададӣ ҳудуди қадам аз рӯи вақт вобаста ба қадами координатаҳои фазой муайян карда шуд. Дар ин ҳолат симтурҳои 6x6, 8x8, 10x10, 12x12 дида баромада шуданд. Таъсири зичигардони симтур ба натиҷаҳои ҳисоби динамикӣ таҳқиқ ёфта, нишон дода шуд, ки симтури 10x10 (барои масъалаи дида баромадашуда) оптималӣ аст [2-М].

2. Дар асоси алгоритми коркард шуда ва барномаи ҳисобӣ, аксуламали қишр барои шартҳои канории зерин муайян карда шуд: мазбутии саҳт, таъйи бандакдор-беҳаракат, таъйи бандакдор-ҳаракатнок [1-М].

3. Рафтори динамикии қишри камфароз бо назардошти нармии унсурҳои канорӣ таҳқиқ ёфт. Муодилаҳои ҳаракати унсури канорӣ бо ин фикри, ки меҳвари он бо сатҳи миёнаи қишр мувофиқат мекунад, ба даст оварда шуданд. Аз аппроксиматсияи тафовутии ин муодилаҳо формулаҳои рекурентӣ барои муайян кардани ҷойивазкуниҳо ва кунҷҳои гардиши унсури канорӣ ба даст оварда шуданд [2-М].

4. Усул тарҳрезӣ шуда ва натиҷаҳои лаппишҳои қишр бо назардошти лаппишҳои тулӣ, арзии берун аз ҳамворӣ, арзии дар даруни ҳамворӣ ва лаппишҳои чархзанандаи канори контурӣ ба даст оварда шуданд. Муқоисаи ин натиҷаҳо нишон дод, ки ҳаракати канори контурӣ берун аз ҳамворӣ худ намунаи рафтори динамикии қишрро ба таври назаррас тағйир медиҳад (масалан, нисбат ба ҳаракати арзии дар ҳамворӣ, қимати миёнаи ҳамиши маркази қишр 30% афзоиш меёбад, қувваи нормалӣ ва моменти ҳамкунанда, баръакс, мутаносибан 22% ва 60% коҳиш меёбанд). Натиҷаҳо барои андозаҳои гуногуни буриши кундалангӣ канор ба даст оварда шуданд [4-М].

5. Бо усули тарҳрезӣ шуда, ҳалли масъалаҳои рафтори динамикии қишр бо назардошти лаппишҳои ҳамиш- тулӣ ва ҳамиш- чархзанӣ канори контурӣ ба даст оварда шуданд. Таҳлили натиҷаҳои бадастомада нишон медиҳад, ки дар лаппишҳои ҳамиш - тулии канор нисбат ба лаппишҳои ҳамиш - чархзании он, қиматҳои миёнаи ҳамшавӣ дар маркази қишр 16% афзоиш ёфта, қувваи нормалӣ ва моменти ҳамкунанда, баръакс, мутаносибан 5% ва 11% коҳиш меёбанд [1-М].

6. Лаппишҳои ҳамиш - тулии канори контурӣ (буриши 1x0,5) дар маҷмӯъ ба коҳиши қувваҳои дохилӣ ва ҷойивазкунӣ дар гиреҳҳои қишр нисбат ба диафрагмаи идеалӣ дар шароити баробари чандрӣ меоранд. Қувваи нормалӣ ва қувваи гечанда тақрибан 15-20% коҳиш меёбад, ҳамшавӣ ва моменти ҳамкунанда - 20-25% [1-М].

7. Рафтори динамикии қишр бо назардошти кори конструкцияҳои дастгиркунанда таҳқиқ карда шуд. Нишон дода шуд, ки дидабарии конструкцияҳои дастгиркунанда ба намуди таъягоҳҳои чандринармӣ боиси афзоиши амплитуда ва даври лаппишҳои маркази қишр мегардад [4-М].

8. Алгоритм тарҳрезӣ шуда ва натиҷаҳои лаппишҳои қишр бо назардошти лаппишҳои ҳамиш - тулии канори контурӣ ва пайвандҳои чандринармӣ

нуқтаҳои кунҷӣ ба даст оварда шуданд. Ҳалли масъалаи ҳаракати интиқолий-гардишии диски қишр аз таъсири ғайрисимметрӣ ба даст оварда шуд [1-М].

9. Муқоисаи натиҷаҳои маълуми ҳалли масъалаи лаппиши арзии болор бо шартҳои гуногуни канорӣ ва системаи бо як дараҷаи озод бо натиҷаҳои ҳалли ҳамин масъалаҳо бо усули пешниҳодшуда ба хулосае меорад, ки усули истифодашуда дар қиматҳои кофӣ дақиқ барои зудии шакли аввал медиҳад. Ҳамин тавр, назардошти деформатсияшавии унсурҳои канорӣ ва конструксияҳои дастгиркунанда имкон медиҳад, ки ақсуламали қишрро вобаста ба вақт нисбат ба қишрҳои бо диафрагмаҳои идеалӣ ва конструксияҳои дастгиркунанда мазбут дақиқтар муайян карда, оиди лоиҳакашии амалии қишрҳо дар ноҳияҳои заминларза, инчунин барои қабули дигар таъсироти динамикӣ тавсия дода мешавад [3-М, 5-М].

Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳо

Алгоритм ва барномаи таҳияшуда имконият медиҳад, ки ахлоқи динамикии қишри камфароз аз таъсири ҳаргуна, аз он ҷумла таъсири сейсмикӣ таҳқиқ карда шавад ва барои таҳлили муқоисавии аксуламали сейсмикӣ дар институтҳои лоиҳакашӣ мумкин аст истифода бурда шавад.

Методикаи пешниҳодшудаи ҳисоб ва барномаҳои компютери таҳиякардаи муаллиф, ки ба усули фарқиятҳои ниҳой асос ёфтаанд, дар амалияи тарҳрезии институти лоиҳакашии "Душанбешаҳрсоз" барои иҷрои ҳисобҳои муқоисавии болопушҳо дар намуди қишри тунуки камфароз аз таъсири қувваҳои сейсмикӣ истифода шудаанд.

Барномаи компютери таҳияшудаи ҳисобкунии динамикии қишри камфароз бо усули фарқиятҳои ниҳой минбаъд ҳангоми тарҳрезии биноҳои яқинонаи схемаҳои гуногуни конструктивӣ истифода бурда мешаванд.

Масъалаҳои назариявӣ ва амалии диссертатсия дар раванди таълими донишгоҳи давлатии Хоруғ ба номи М. Назаршоев барои ихтисоси 1700401-01 "Соҳтмони Гидротехникӣ" ҳангоми тайер кардани магистрҳо, докторҳои PhD ва гузаронидани экспертизаи лоиҳаҳои кории биноҳои яқинонаи синҷӣ истифода бурда мешаванд.

Натиҷаҳои асосии кор дар нашрияҳои зерин ҷоп шуданд:
а) Мақолаҳо дар нашрияҳои, ки Комиссияи олии аттестатсионии
назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон тавсия додааст

[1-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное решение динамической задачи пологой оболочки методом конечных разностей [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова //Вестник Таджикского технического университета. Серия инженерных исследований. - 1(61) 2023. - С. 170-175.

[2-А] **Джонмамадова М.Т.** Динамическое исследование пологих оболочек [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова // Вестник Таджикского технического университета. Серия инженерных исследований. - 2 (62) 2023. - С. 206-214.

[3-А] **Джонмамадова М.Т.** Моделирование динамической задачи пологой оболочки. [Текст] / Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Джонмамадова М.Т. //Вестник Таджикского технического университета. Серия инженерных исследований, №3 (63) 2023. - С. 155 -164.

[4-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное моделирование динамических задач пологой оболочки [Текст] / /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова, А.П.Мамаднабиева //Вестник Хорогского университета. Серия инженерных исследований - (ISSN 22664-54696), № 2, 2024. - С. 215-221.

[5-А] **Джонмамадова М.Т.** Методы исследования колебаний оболочек при сейсмических воздействиях. //Вестник Хорогского университета. Серия инженерных исследований - (ISSN 22664-54696), №4, 2024. - С. 201- 204.

б) Мақолаҳо дар маводҳои конфронс.

[6-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное моделирование динамических задач пологих оболочек методом конечных разностей [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова //Международная научно-теоретическая конференция «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горных условий: проблемы, новые подходы и актуальные исследования», посвящённой 30 - летию сессии Верховного совета Республики Таджикистан и 30 - летию Хорогского государственного университета им. М. Назаршоева. Хорог, 2022. - С. 32-36.

[7-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное моделирование пологой оболочки от динамического воздействия [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова // Материалы республиканской научно - практической конференции (с международным участие) «Вклад женщин в развитие архитектуры и строительство Таджикистана» посвящённой 20 летию

изучения и развития естественных, точных и математических дисциплин в области науки и образования (2020-2040г.) Душанбе, 28 ноября 2023.- С. 56-60.

[8-А] **Джонмамадова М.Т.** Численное решение динамических задач пологой оболочки [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова // Материалы республиканской научно - практической конференции «Архитектура и градостроительство». Часть 1. ТТУ им. акад. М.С.Осими. Душанбе, 26.03.2024. - С. 214-218.

[9-А] **Джонмамадова М.Т.** Решение задач по расчёту пологих оболочек [Текст] /Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков, М.Т.Джонмамадова //Материалы III -й международной научно-теоретической конференции «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горного региона: проблемы, новые тенденции и соответствующие исследования» ХоҒу им. М Назаршоева, Хорог, 14-15 июня 2024. - С. 27-31.

Аннотация

диссертации Джонмамад Мохру Тохир «Численное моделирование динамических задач пологих оболочек», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.00 – Строительство и архитектура (05.23.17 – Строительная механика)

Ключевые слова: оболочка, динамическая теория, динамическое воздействие, поддерживающие конструкции, контурные элементы, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, явная схема, неявная схема, граничные условия, динамическое уравнение, колебания оболочки.

Целью диссертационной работы: является численное моделирование динамических задач теории пологих оболочек, а также разработка соответствующих алгоритмов и компьютерных программ.

Полученные результаты и их новизна состоит в следующем: по разработанной методике на примере пологой оболочки показано применение метода конечных разностей для решения моментных динамических уравнений, исследованы границы изменения шага по времени и влияние сгущения сетки на результаты численного расчёта; разработана методика и решена задача о динамическом поведении оболочки с учётом продольных, поперечных из плоскости, поперечных в плоскости и крутильных колебаний контурного ребра; решена задача о колебании оболочки с учётом пространственной работы контурного ребра; решена задача о колебании оболочки с учётом инерции поддерживающих конструкций (в случае симметричного воздействия на опорной части системы «оболочка-поддерживающая конструкция»); получены уравнения и разработан алгоритм расчёта поступательно-вращательного диска оболочки.

Рекомендации по использованию: разработана методика и компьютерной программы для расчёта пологих оболочек перекрытий МКР. Разработанные методика, алгоритма и компьютерные программы могут быть успешно применены при проектировании зданий для расчёта оболочки с различными граничными условиями, а также может быть использована для исследования напряженно-деформированного состояния оболочки перекрытий одноэтажных зданий.

Область применения: проектные и научно-исследовательские институты при проектировании и расчёте оболочки перекрытий одноэтажных зданий. Теоретические и прикладные результаты диссертации внедрены в практику исследования ГУП НИПИ «Душанбешахрсоз» а также в учебный процесс Хорогского государственного университета им. М. Назаршоева.

Аннотатсия

диссертатсияи Ҷонмамад Моҳру Тохир «Моделкунонии ададии масъалаҳои динамикии қишри камфароз» барои дарёфти дараҷаи илмӣ номзоди илмҳои техникӣ аз руи ихтисоси 05.23.00 – Сохтмон ва меъморӣ (05.23.17 – Механикаи сохтмон)

Калимаҳои калидӣ: қишри камфароз, назарияи динамикӣ, таъсири беруна, конструкцияҳои дастгиркунанда, унсурҳои канорӣ, моделсозии ададӣ, ҳолати шиддатнокӣ деформатсионӣ, схемаи ошкор, схемаи ниҳон, шартҳои сарҳадӣ, муодилаҳои динамикӣ, лаппиши қишр.

Мақсади таҳқиқот: моделкунонии ададии масъалаҳои динамикии назарияи қишри камафроз ва коркарди алгоритмҳо ва барномаҳои компютерӣ.

Навгони илмӣ таҳқиқот: бо методикаи коркардшуда, дар мисоли қишри камфароз, истифодаи методи фарқиятҳои охиринок барои ҳалли муодилаҳои динамикии моментӣ нишон дода шудааст; сарҳади тағйирёбии қадам бо мурури вақт ва таъсири зичии симтур бо натиҷаҳои ҳисоби ададӣ таҳқиқ шудааст; методика коркард шудааст ва масъалаи рафтори динамикии қишр бо баҳисобгирии лаппишҳои тулӣ, арзӣ берун аз ҳамворӣ, арзӣ дар дохили ҳамворӣ ва чархзанандаи тегаи контурӣ; масъалаи лаппиши қишр бо ба ҳисобгирии қори фазои канори контурӣ ҳал карда шудааст; масъалаи лаппиши қишр бо дарназардошти инертсияи конструкцияҳои дастгиркунанда (дар ҳолати таъсири симметрӣ ба қисми таъягоҳии системаи «қишр-конструкцияҳои дастгиркунанда» ҳал карда шудааст; муодила ва алгоритми коркардшуда оиди ҳисоби хаттӣ-чархзанандаи диски қишр бадаст оварда шудааст.

Тавсияҳо барои истифода: методика, алгоритм ва барномаҳои компютери коркардшуда метавонанд барои ҳисоби қишрҳои камфароз оиди лоиҳакашии болопӯшҳои биноҳои якошӯна бо шартҳои гуногуни канорӣ бомуваффақият истифода бурда шаванд ва инчунин мумкин аст барои таҳқиқи ҳолати шиддатнокӣ-деформатсионии қишрҳои камфароз истифода бурда шаванд.

Соҳаи истифодабарӣ: институтҳои лоиҳакашӣ ва илмӣ - таҳқиқоти барои лоиҳакашии оиди ҳисоби қишрҳои болопӯши биноҳои якошӯна. Натиҷаҳои назариявӣ ва амали диссертатсия дар амалияи таҳқиқи КВД ПИТЛ «Душанбешаҳрсоз» ва ҳамчунин дар раванди таълими Донишгоҳи давлатии Хоруғ ба номи М. Назаршоев татбиқ карда шудааст.

Annotation

of the dissertation by Johnmamadova Mokhru Toirovna “Numerical modeling of dynamic problems of flat shells,” submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.23.00 – Construction and Architecture (05.23.17 – Structural Mechanics)

Keywords: shell, dynamic theory, dynamic impact, supporting structures, contour elements, numerical modeling, stress-strain state, explicit scheme, implicit scheme, boundary conditions, dynamic equation, shell vibrations.

The aim of the dissertation is to perform numerical modeling of dynamic problems in the theory of thin shells and to develop corresponding algorithms and computer programs.

The results obtained and their novelty are as follows: using the developed methodology, the application of the finite difference method for solving moment dynamic equations is demonstrated on the example of a thin shell; the boundaries of step changes over time and the influence of mesh refinement on the results of numerical calculations are investigated; a methodology has been developed and the problem of the dynamic behavior of the shell has been solved, taking into account longitudinal, transverse out-of-plane, transverse in-plane, and torsional vibrations of the contour edge; the problem of shell vibration was solved taking into account the spatial work of the contour edge; the problem of shell vibration was solved taking into account the inertia of supporting structures (in the case of symmetrical action on the supporting part of the “shell-supporting structure” system) was solved;

Recommendations for use: methods and computer programs have been developed for calculating flat shells of MCR floors. The developed methodology, algorithm, and computer programs can be successfully applied in the design of buildings to calculate shells with various boundary conditions, and can also be used to study the stress-strain state of shells for single-story buildings.

Scope of application: design and research institutes in the design and calculation of single-story building floor shells. The theoretical and applied results of the dissertation have been implemented in the research practice of the State Unitary Enterprise NIPI “Dushanbeshahrsoz” as well as in the educational process of the Khorog State University named after M. Nazarshoev.