МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА»

На правах рукописи

УДК 624.072.2.011.1

МАКАРОВ АРТЕМ АЛЕКСЕЕВИЧ

ДЕФОРМАТИВНОСТЬ СИСТЕМ ПЕРЕКРЁСТНЫХ БАЛОК ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент **А.В. Турков**

Орел – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	7
1	СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. НАПРАВЛЕНИЯ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
1.1	Конструкции и области применения систем перекрёстных балок	14
1.2	Методы статического расчета перекрёстных систем	22
1.3	Методы динамического контроля качества конструкций	32
1.4	Направление и задачи исследования	37
2	ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА И СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ ПЕРЕКРЁСТНЫХ БАЛОК НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ	40
2.1	Функциональная связь максимального прогиба упругих балок и пластинок с их основной частотой колебаний	40
2.2	Результаты исследований систем перекрёстных балок на квадратном плане	46
2.2.1	Результаты исследований систем перекрёстных балок в зависимости от жёсткости связей и размера ячеек	49
2.2.2	Результаты исследований систем перекрёстных балок в зависимости от схемы опирания	50
2.2.3	Исследования систем перекрёстных балок с покрытием по верхнему поясу в зависимости от жёсткости узловых связей СПБ и размера ячеек	55
2.2.4	Результаты исследований систем перекрёстных балок с покрытием по верхнему поясу в зависимости от податливости связей, крепящих элементы покрытия к элементам системы перекрёстных балок	59
2.2.5	Результаты исследований систем перекрёстных балок с покрытием по верхнему поясу в зависимости от жёсткости покрытия и размера ячеек	63
2.2.6	Сопоставление результатов исследований систем перекрёстных балок без покрытия и с покрытием по верхнему поясу	67
2.3	Результаты исследований систем перекрёстных балок на прямоугольном плане	70

2.3.1 Результаты исследований систем перекрёстных балок в зависимости от жёсткости узловых соединений и размера ячеек на прямоугольном плане 71
2.3.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок на прямоугольном плане в зависимости от схемы опирания и размера ячеек 76
2.3.3 Результаты исследований систем перекрёстных балок на прямоугольном плане с покрытием по верхнему поясу 79
2.4 Выводы по главе 2 84
3 ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА И СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ ПЕРЕКРЁСТНЫХ БАЛОК НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ 87
3.1 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане при изменении податливости узловых соединений 87
3.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане в зависимости от схемы опирания 92
3.3 Исследования систем перекрёстных балок на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу в зависимости от жёсткости узловых связей СПБ и размера ячеек 95
3.4 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу в зависимости от схемы опирания 99
3.5 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу в зависимости от податливости связей, крепящих элементы покрытия к элементам системы перекрёстных балок 103
3.6 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу в зависимости от жёсткости покрытия и размера ячеек 106
3.7 Сопоставление результатов исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане без покрытия и с покрытием по верхнему поясу 109
3.8 Выводы по главе 3 113

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ПЕРЕКРЁСТНЫХ БАЛОК 115
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований систем перекрёстных балок на квадратном плане 115
4.1.1 Схема экспериментального стенда 115
4.1.2 Методика проведения статических испытаний 117
4.1.3 Методика проведения динамических испытаний 119
4.1.4 Определения кратковременного модуля упругости древесины элементов СПБ 120
4.2 Результаты исследований системы перекрёстных балок на квадратном плане с размером ячеек 0,4 × 0,4 м. 124
4.2.1 Определение фактической податливости узловых соединений СПБ 124
4.2.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок при различной схеме опирания 126
4.2.3 Результаты исследований СПБ с покрытием, при изменении жесткости крепления покрытия к элементам СПБ 132
4.2.4 Результаты исследований СПБ с покрытием при различной схеме опирания 137
4.3 Результаты исследований системы перекрёстных балок на квадратном плане с размером ячеек 0,6 × 0,6 м. 142
4.3.1 Определение фактической податливости узловых соединений СПБ 142
4.3.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок при различной схеме опирания 144
4.3.3 Результаты исследований СПБ с покрытием, при изменении жесткости крепления покрытия к элементам СПБ 149
4.3.4 Результаты исследований СПБ с покрытием при различной схеме опирания 155
4.4 Выводы по главе 4 159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 162
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ 164

ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 176
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 180
ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 183
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОДАТЛИВОСТИ СВЯЗЕЙ, КРЕПЯЩИХ ЭЛЕМЕНТЫ ПОКРЫТИЯ К ЭЛЕМЕНТАМ СПБ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 187
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЁСТКОСТИ ПОКРЫТИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 191
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 195
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 209
ПРИЛОЖЕНИЕ И. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 219
ПРИЛОЖЕНИЕ К. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЁСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 233
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 237

ПРИЛОЖЕНИЕ М. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 240
ПРИЛОЖЕНИЕ Н. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 244
ПРИЛОЖЕНИЕ П. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОДАТЛИВОСТИ СВЯЗЕЙ, КРЕПЯЩИХ ЭЛЕМЕНТЫ ПОКРЫТИЯ К ЭЛЕМЕНТАМ СПБ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 247
ПРИЛОЖЕНИЕ Р. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЁСТКОСТИ ПОКРЫТИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК 251
ПРИЛОЖЕНИЕ С. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ 255

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Проектирование современных зданий и сооружений неразрывно связано с расчетами на прочность, устойчивость и жесткость конструкций, которые находятся под действием статических и динамических нагрузок.

Составные стержни из древесины представляют собой особый тип конструкций - механические связи, которые соединяют отдельные элементы, являются податливыми. Это является отличительной особенностью характера работы данного вида конструкций от стержней из других материалов. Поэтому следует учитывать эти значительные особенности при расчете таких конструкций.

Изучением составных стержней на податливых связях и их несущей способности, жесткости и устойчивости занимаются как за рубежом, так и в России. В опубликованных исследованиях рассматриваются вопросы воздействия статических нагрузок на напряжённо-деформированное состояние балок. Однако, стоит отметить, что влияние воздействия динамических нагрузок на работу составных деревянных стержней и пластин изучено не достаточно полно.

Новые способы исследования балок и пластин были предложены профессором В.И. Коробко, основанные на выявленной им фундаментальной закономерности в строительной механике. Функциональная взаимосвязь между интегральными физическими параметрами строительных конструкций, в частности, между максимальным прогибом нагруженных конструкций в виде балок и пластинок и их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии легло в основу исследования. Совместное рассмотрение двух видов деформации конструкций (поперечного изгиба и свободных колебаний) с учетом выявленной закономерности, позволили разработать методы диагностики и контроля качества проектируемых и эксплуатируемых конструкций, в том числе в условиях ограниченной информации о свойствах материала

конструкций, сведений об их реальных граничных условиях, об интенсивности действующей внешней нагрузки и других факторов.

Это положило начало для развития динамических методов диагностики и обследования строительных конструкций на основе вибрационных технологий.

Важной задачей, которая может эффективно решаться вибрационными методами, является задача уточнения расчётных схем конструкций, находящихся в условиях эксплуатации. При проектировании конструкций используют идеализированные расчётные схемы, которые не отражают реальных условий опирания и схем приложения нагрузки при эксплуатации.

Таким образом, следует учитывать для конструкций из древесины, податливость узловых соединений. Само понятие «жёсткое сопряжение», когда в узле отсутствует поворот сечения, к конструкциям из таких материалов неприменимо. Степень податливости узловых соединений определяется конструктивным оформлением узла, видом применяемых связей, площадью смятия, направлением усилия смятия относительно направления волокон и т.п.

В настоящее время, несмотря на широкое применение ЭВМ в расчётной практике и наличие возможности реализовывать численные методы, существует потребность в разработке простых в применении приближённых аналитических методов, которые позволяли бы относительно быстро и с приемлемой точностью проводить оценки интегральных характеристик строительных систем.

Фундаментальная зависимость В.И. Коробко распространяется на изотропные конструкции в виде отдельных стержней (балок) и пластинок постоянного сечения. Однако выявленная закономерность не может быть применена для составных конструкций сложного вида, таких как системы перекрёстных балок. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования необходимы для выявления особенностей деформирования таких конструкций в условиях их статического и динамического нагружений. Таким образом, установление применения функциональной зависимости для систем пе-

рекрестных балок на податливых связях является актуальной и определяет общую постановку исследования.

Объекты исследования. Объектами исследования являются системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов на податливых связях. Предметом исследования являются методы диагностики и неразрушающего вибрационного контроля отдельных физических параметров систем перекрестных балок.

Целью диссертационной работы является теоретические и экспериментальные исследования деформативности систем перекрёстных балок из деревянных клееных элементов при статическом и динамическом нагружении с учетом податливости соединений при изменении размеров ячеек, схемы опирания и включением в работу элементов покрытия.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- определить влияние податливости узловых соединений элементов, схемы опирания конструкции, включение в работу СПБ покрытия на максимальный прогиб и основную частоту собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном и треугольном плане;

- установить взаимосвязь между максимальными прогибами и собственными частотами поперечных колебаний систем перекрёстных балок из деревянных клееных элементов;

- разработать и изготовить стенд для проведения экспериментальных исследований систем перекрёстных балок;

- провести серию экспериментальных исследований систем перекрёстных балок с изменением жёсткости узловых соединений, схемы опирания, размеров ячеек, включения в работу элементов покрытия.

Методология и методы исследования. В ходе проведения теоретических исследований использовались аналитические и численные методы строительной механики и теории сооружений. При использовании численных методов расчета применялся программный комплекс «SCAD», реализующий

метод конечных элементов. При проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов использовались методы математической статистики.

Достоверность научных положений и результатов подтверждается:

– использованием фундаментальных принципов и методов строительной механики;

– сопоставлением результатов, полученных численными, теоретическими и экспериментальными методами.

Научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований получены следующие новые научные результаты:

– выявлена зависимость максимальных прогибов и частот собственных колебаний системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов от податливости узловых соединений, размера ячеек системы, схемы опирания и жёсткости покрытия к элементам СПБ на прямоугольном и треугольном плане;

– теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов, шарнирно-опёртые по контуру, при разных размерах ячеек и изменяемой податливости соединения, подчиняются фундаментальной закономерности о строгой функциональной зависимости их максимального прогиба от основной частоты колебаний;

– установлены пределы применимости указанной закономерности для системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов в зависимости от соотношения податливости узловых соединений, количества опор по контуру, от степени включения в работу системы покрытия и от размеров ячейки СПБ на прямоугольном и треугольном плане.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

– доказательство зависимости максимальных прогибов и частот собственных колебаний системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов от жесткости узловых соединений, размера ячейки, схемы опирания и степени включения в работу СПБ элементов покрытия;

– доказательство взаимосвязи максимального прогиба и основной частоты собственных колебаний системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов;

– методика оценки степени податливости узловых соединений;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований систем перекрестных балок из деревянных клееных элементов на упруго-податливых связях.

Практическая ценность и реализация работы. Разработанные в диссертации динамические методы определения жёсткости узловых соединений элементов, а также установленные пределы применимости фундаментальной закономерности для систем перекрестных балок на податливых связях, могут найти широкое применение при проектировании, усилении, обследовании и оценке технического состояния подобных конструкций.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на ежегодных научно-практических конференциях «Госуниверситета – УНПК» (2013–2015 гг.), на XVI Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2013); на 3-й Всероссийской конференция «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирск, 2014); на IX Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам (Йошкар-Ола, 2014); на Международной научно-технической конференции «Строительная наука-2014: теория, образование, практика, инновации» (Архангельск, 2014); на Международной научно-технической конференции «Строительная наука – XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону» (Архангельск,

2015); на научно-технической конференции «Деревянные конструкции: разработка, исследование, применение» в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (Москва, 2016); на III Международной конференции (IX Всероссийской конференции) НАСКР-2016 (Чебоксары, 2016).

Публикации. По теме исследования опубликовано 16 научных работ, в том числе 10 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 104 наименование и 15 приложений. Работа изложена на 257 страницах, включая 114 рисунков, 46 таблиц.

Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, приводится её общая характеристика, формулируются основные цели и задачи исследования, обсуждается достоверность и научная новизна результатов работы, их практическая ценность, также содержится информация по апробации работы.

В первой главе изложено современное состояние вопроса по конструированию и области применения систем перекрестных балок, методы статического и динамического расчета перекрёстных систем, сформулированы направление и задачи исследования.

Вторая глава посвящена доказательству функциональной связи максимального прогиба упругих балок и пластинок с их основной частотой колебаний. Установлена взаимосвязь поперечного изгиба и свободных колебаний систем перекрёстных балок на прямоугольном плане. Выявлена взаимосвязь между основной частотой собственных колебаний систем перекрёстных балок и максимальными прогибами от равномерно распределенной ста-

тической нагрузки. Рассмотрено влияние податливости узловых соединение, схемы опирания и степень включения элементов покрытия на частоты собственных колебаний и прогибы систем перекрестных балок.

В третьей главе исследуются взаимосвязи поперечного изгиба и свободных колебаний систем перекрёстных балок на треугольном плане. Выявлена взаимосвязь между основной частотой собственных колебаний систем перекрёстных балок и максимальными прогибами от равномерно распределенной статической нагрузки. Рассмотрено влияние податливости узловых соединение, схемы опирания и степень включения в работу элементов покрытия на частоты собственных колебаний и прогибы систем перекрёстных балок.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям систем перекрёстных балок на динамические и статические нагрузки. Приведена методика проведения статических и динамических испытаний. Разработана методика учета жёсткости узловых соединений при проведении эксперимента. Приводятся данные экспериментальных исследований максимального прогиба и частот собственных колебаний систем перекрестных балок с различным размером ячейки. Проведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных испытаний СПБ при статических и динамических нагрузках. Выявлено, что экспериментальные данные подтверждают результаты теоретических исследований.

По результатам исследований сделано **заключение**.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. НАПРАВЛЕНИЕ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Конструкции и области применения систем перекрёстных балок

Работа ученых разных отраслей по исследованию физико-механических свойств древесины, клеевых соединений, совершенствованию конструктивных решений и методов расчёта положила начало широкому применению индустриальных клееных деревянных конструкций (КДК).

На базе крупных научно-исследовательских институтов, кафедр и лабораторий строительных, лесотехнических и политехнических вузов, проектных организаций создавались группы для разработки, исследования и обобщения полученных знаний в области КДК.

Первыми начали рассматривать древесину и фанеру как анизотропный (ортотропный и транстропный) материал в своих работах Е.К. Ашкенази [1,2], А.Н. Митинский [47], А.Л. Рабинович [55]. В то же время исследования конструктивных решений и расчётов надежности и долговечности КДК встречаются в работах В.В. Большакова [6], А.Б. Губенко [10], В.Ф. Иванова [13], Г.Г. Карлсена, М.Е. Кагана [17], Б.А. Освенского, Ю.В. Слицкоухова [16,52,63], Е.И. Светозаровой [56…60] и др.

Совокупность полученных знаний позволила усовершенствовать и создать новые типы КДК. Однако остался ряд проблем, связанных с технологией производства, появлением новых материалов и конструкций, требующих решения.

Перекрёстно-балочные деревянные конструкции, образующиеся балками двух или трех направлений и совместно работающих с ними настилов из досок или плитных конструкций, являются эффективными пространственными покрытиями. Применимость данных конструкций целесообразна при перекрытии квадратных или прямоугольных в плане зданий с соотношением сторон не более 1:1,5.

Опирание перекрёстных систем может выполняться по всему контуру, так и на отдельные его части или на колонны. Но стоит учесть, что при опирании только в углах конструкции, его контурные элементы будут принимать всю нагрузку от покрытия, следовательно, они должны иметь большую высоту сечения, чем основные элементы систем перекрёстных балок.

В XX веке к перекрёстно-балочным деревянным конструкциям проявлялся устойчивый интерес, как в нашей стране, так и за рубежом [4,15,99,102], но исследования в основном касались перекрёстно-стержневых металлических систем. Вопросы экспериментального исследования, проектирования и расчёта таких систем отражены в работах Б.Г. Бегуна [75], Л.Н. Лубо, М.Ш. Минцковского, Б.А. Миронова [40,46], А.П. Морозова [48], В.И. Трофимова, В.К. Файбишенко [74,94], и Р.И. Хисамова [96] и др.

Работу над изучением комбинированных металлодеревянных перекрёстно-стержневых конструкций вели: П.А. Дмитриев [12], С.В. Колпаков, Г.В. Кривцова [53], А.Г. Кондаков [18] и Ю.Д. Стрижаков [49], Я.Ф. Хлебной [97], и др. Данный тип конструкции имеет преимущества структурных плит, но стоит отметить, что технология изготовления трудоемка, а огнестойкость по сравнению с массивными конструкциями мала.

В последние годы изучением деревянных конструкций занимаются Н.В. Линьков [36], К.П. Пятикрестовский [54] на базе Московского государственного строительного университета, М.Ю. Кононова, К.В. Семенов [61] - Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, В.А. Будаев, А.А. Колесникова [8] - Поволжский государственный технологический университет, Б.В. Лабудин [33…35] и В. И. Мелехов [45] на базе Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, М.С. Лисятников [37…39]

на базе Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых и др. За рубежом стоит отметить работы [100,103,104].

Для создания архитектурной выразительности общественных зданий и сооружений большое значение имело начало промышленного производства клееной древесины и водостойкой фанеры. Основные преимущества клееных деревянных конструкций – разнообразие геометрических очертаний и форм поперечных сечений, возможность перекрытия больших пролетов, легкость сборных элементов, удобная транспортировка.

Системы перекрёстных балок (СПБ) из сборных клееных деревянных элементов сочетают в себе архитектурную выразительность и эффективность пространственных конструкций с простотой и технологичностью балочных, высокую унификацию и сборность с хорошей транспортабельностью.

Прототипом современных металлических структурных плит стала первая, построенная в Париже 40-х годах, перекрёстно-стержневая конструкция по проекту Р. Ле Риколе [101].

Одна из первых перекрёстно-балочных деревянных систем включала в себя клеефанерные балки двутаврового сечения, расположенные перпендикулярно друг к другу. Основные составляющие: полки – древесина хвойных пород, стенки – водостойкая фанера, вклеенная по всей длине в пазы полок. Дополнительно в узлах конструкции устанавливались стыковочные элементы: в верхнем поясе – фанерные накладки на клею и гвоздях, в нижнем поясе – сквозные бруски, поставленные на клей и болты или фанерные накладки, как и в верхнем поясе. Это было необходимо для достижения неразрезности данной конструкции. Сборка конструкции производилась на проектной отметке. Данный тип конструкции позволяет трём рабочим выполнить 15 м^2 покрытия за один час. Проведённые испытания установили – при действии расчётной нагрузки прогиб составил 54% от допустимого, равного 1/330 пролёта, что показывает высокую жёсткость описанного вида конструкции. Одним из недостатков конструкции

является необходимость высокоточного изготовления элементов и деталей узлов, что повышает трудоёмкость. Также стоит отметить, что сжатые (верхние) пояса балок одного направления примыкают к балкам другого направления поперёк волокон, т.е. в направлении наименьшей прочности древесины. Двутавровое сечение балок, и его относительно малые размеры, требуют выполнения перечня мероприятий для защиты конструкции и обеспечения пожарной безопасности.

На кафедре строительных конструкций и деревянных сооружений технического университета в Мюнхене, занимались изучением различных видов перекрёстных систем, в том числе деревянных покрытий типа пространственной плиты. Они представляли собой системы перекрещивающихся многослойных пакетов досок, связанных по высоте податливыми связями (гвоздями) или клеем. В узлах часть досок каждого пакета перерезалась для образования прямоугольных отверстий, сквозь которые проходили неперерезанные доски пакетов других направлений. Данный вид конструкции имеет следующие недостатки: большую материалоемкость и трудоемкость, низкую индустриальность производства. Использование деревянных покрытий типа пространственной плиты рационально при строительстве общественных зданий и сооружений. Этот принцип построения узлов применён при устройстве покрытия жилого дома в г. Штраубинге, которое состоит из трех секций СПБ, опертых на колонны с различным шагом (наибольший пролет 6 м). Размер ячеек 1×1 м, сечение балок 90×450 мм. Конструкция изготовлялась непосредственно на строительной площадке в уровне земли и устанавливалась в проектное положение вместе с кровельным покрытием.

Следующим этапом развития конструкций стало совершенствование принципов сборности, передачи и восприятия изгибающих моментов в узлах. Например, покрытие культового здания на квадратном плане 25 × 25 м, сборка которого осуществлялась в проектном положении. Возникающие в

покрытии усилия воспринимаются двойным дощатым настилом и стальными узловыми деталями в пересечении балочных элементов. Соединение двухступенчатых балок сечением 260 × 1360 мм осуществляется посредством стальных узлов через зубчатые пластины и болты диаметром 36 мм. Для уменьшения числа болтов эти пластины достаточно велики. Кроме того, между узлами пропущены тяжи из полосовой стали. Поэтому в данной конструкции ощущается явный запас прочности и излишняя материалоемкость.

Необычно решение конструкции, образованной балками трех направлений сечением 120×600 мм и длиной 2,7 м, в покрытии школьного здания в г. Гуртвайль. Здесь растягивающие усилия воспринимаются через дюбели тремя пересекающимися металлическими полосами длиной 1700 мм, шириной 80 мм и толщиной 10 мм, вставленными в горизонтальные пазы ребер. Диаметр дюбелей 20 мм, длина 180 мм. Сжимающие усилия воспринимаются бетонным упором, образованным путем замоноличивания на всю высоту межбалочного пространства между торцами сходящихся в узле ребер. Как недостаток следует отметить, что замоноличивание является «мокрым» процессом и без должной защиты может привести к резкому увеличению напряжений на границе «клеевой шов–древесина», а также увеличивается собственный вес покрытия за счет бетона.

В российских городах можно привести следующие примеры использования данных систем. Были разработаны и осуществлены покрытия трех кафе в гг. Дмитрове, Солнечногорске, у разъезда Дубосеково. Перекрываемые помещения 12×24 м имеют сетку колонн 6×6 м. Клееные элементы сечением 120×400 мм образуют ячейки 1,5×1,5 м. Совместная работа перекрёстных балок и расположение их в одном уровне обеспечивались устройством врезок «вполдерева» с последующим усилением ослабленного сечения приклеиванием накладок из досок 1 категории толщиной не менее 0,1 высоты элемента с гвоздевой запрессовкой в

построечных условиях либо без накладок. Такие перекрёстные системы не встречают транспортных затруднений, сохраняют принцип сборности и основные преимущества «монолитной» системы. Вместе с тем, результаты испытаний конструкций с усилением и без усиления, как и следовало ожидать, показали значительное снижение несущей способности последней. Очевидно, обе конструкции нельзя признать совершенными, так как значительная часть материала в сечении (особенно без усиления) не работает, а в оставшейся части сечения из-за ослабления возникает значительная концентрация напряжений.

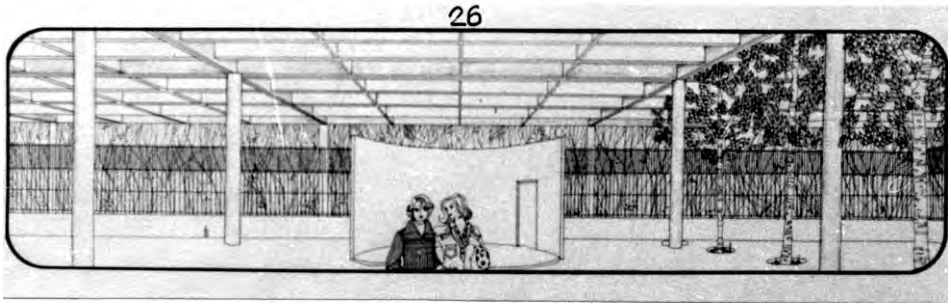
В последнем варианте каждая балка состоит из двух элементов волнистого очертания с длиной полуволны, равной шагу, и стрелой выгиба, равной высоте условной балки. Соединения в узлах выполняются на болтах с упругими шайбами.

Из сказанного видно, что применение первых конструкций типа СПБ ограничивалось пролетом на квадратном плане 6 – 10 метров. Это можно объяснить как отсутствием опыта, так и квалифицированных кадров проектировщиков. В действительности, возможности этих систем не исчерпываются пролетами десять метров и подтверждаются зарубежным опытом. Испытания конструкций говорят о необходимости усиления концов элементов в зонах сосредоточенной передачи продольных усилий.

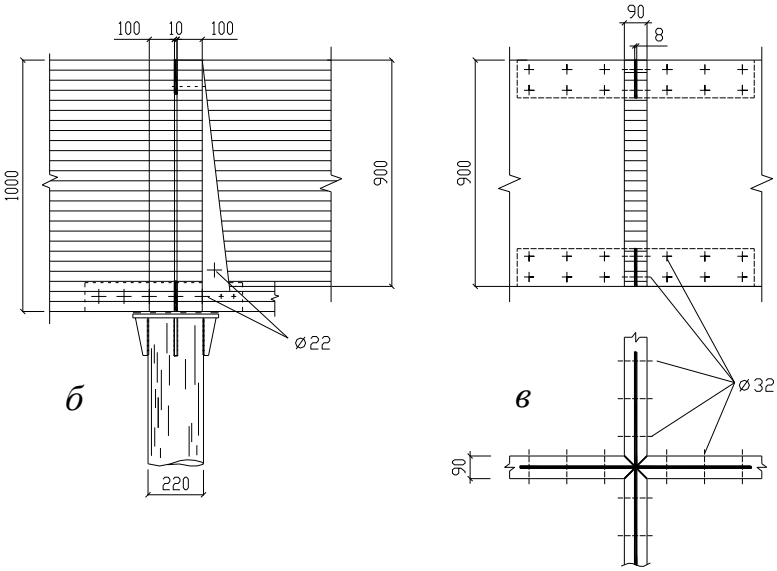
Заслуживает внимания проект покрытия конференц-зала административного здания в городе Северодвинске, разработанный ЛенГИПРОГОРом (конструкторы Г.С. Гурова и А.М. Кацман) при участии ЛИСИ. Покрытие 18×64 м в плане имеет квадратные ячейки размером 3х3 м и состоит из сборных клееных деревянных элементов сечением 1000×190 мм. Торцы элементов упрочнены клиновидными шайбами из ДСП. Усилия в растянутой зоне СПБ воспринимаются крестообразными металлическими сердечниками и высокопрочными болтами, а в сжатой зоне – лобовым упором. Использование шайб позволяет в некоторых случаях решить узел равнопрочным с сечением балок. Недостатком указанного соединения

является трудоемкость изготовления и необходимость специального оборудования.

Представляет интерес проект покрытия молодежного центра в г. Северодвинске (рисунок 1.1). Покрытие размером 48×60 м разбито сеткой колонн на типовые секции 12×12 м. Взаимно перпендикулярные балки сечением 90 × 900 мм расположены с шагом 3 метра образуют квадратные ячейки и опираются на металлические карманы на более жесткие балки сечением 1000 × 100 см, опирающиеся, в свою очередь, на колонны. Узел решен в виде цельносварного сердечника, установленного как в растянутой, так и в сжатой зоне. Чтобы уменьшить число болтов, в одном из вариантов предлагается использовать шайбы Леннова.



а



б *в*

Рисунок 1.1 – Танцевальная площадка 60 × 48 м с типовой секцией СПБ 12 × 12 м (г. Северодвинск): а – общий вид; б – опорный узел; в – пересечение элементов СПБ.

В последние годы разработкой и исследованием СПБ занимаются Л.И. Ярин на базе Московского архитектурного института, О.В. Коржов С. Б.

Турковский [92] в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, также продолжает исследование клееных балочных конструкций Б.В. Лабудин в Северном (Арктическом) федеральном университете [28…32].

Рассмотрев конструкции типа перекрёстно-балочных систем на примерах их применения, можно выделить их основные особенности, сгруппированные по трем признакам:

Архитектурные. Эстетическая выразительность, способствующая созданию современного интерьера с хорошей акустикой; возможность использования перекрёстно-балочных конструкций для зданий с различной конфигурацией в плане, при этом опирание покрытия может быть не только по контуру, но и на промежуточные колонны.

Конструктивные. Живучесть конструкции – случайный выход одного элемента из работы не ведет к разрушению всей конструкции; возможность увеличения отношения высоты балок к ширине без опасности потери устойчивости элементов; унифицированность конструктивных элементов; значительное уменьшение материалоемкости ограждения за счет контурного опирания панелей покрытия.

Технологические. Простота конструктивной формы балочных элементов и, как следствие, возможность изготовления их на автоматизированных линиях; возможность рационального использования узкомерного и короткомерного материала; высокая степень заводской готовности покрытия [95].

Следует заметить, что системы перекрёстных балок из сборных клееных деревянных элементов могут быть изготовлены на любом оборудовании, предназначенном для производства прямолинейных клееных конструкций.

Из анализа приведённых примеров следует, что наибольшее распространение получили СПБ на квадратном или близком к нему плане с ортогональной сеткой (как правило, квадратной) и реже – с треугольной и

шестиугольной. Опирание конструкций осуществляется как на стены, так и на колонны с регулярной и нерегулярной разбивкой сетки.

Наиболее часто конструкции выполняются сборными с применением металлических узлов и крепёжных элементов. В зарубежном строительстве широко применяются зубчатые пластины и шайбы. Балки – дощатоклееные прямоугольного сечения, реже – клеефанерные. Отношение ширины балочных элементов к высоте не превышает 1/5 – 1/6, что приводит к увеличению материалоемкости СПБ.

1.2 Методы статического и динамического расчёта перекрёстных систем

Перекрёстно-балочные или перекрёстно стержневые системы широко применяются в различных отраслях, в том числе промышленном и гражданском строительстве, мостостроении, судостроении, самолётостроении и других конструкциях.

Первый опыт массового использования конструкций типа перекрёстных балок нашел свое применение в судостроении. Теоретические основы расчёта были разработаны и предложены русским ученым-кораблестроителем И.Г. Бубновым. Он разработал курс строительной механики корабля, который опирался на метод расчёта судовых перекрытий в виде ортогональной решётки на прочность и устойчивость [7]. В основе расчёта лежало интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений 4-го порядка, описывающих изгиб плоского перекрытия. Трудоёмкость данного метода не позволила получить широкого применения.

В 1928 г. удалось упростить метод расчёта И.Г. Бубнова путём нахождения частного интеграла для интеграла-дифференциальных уравнений и определение постоянных интегрирования с удовлетворением граничных условий [25]. Метод, разработанный П.Ф. Папковичем, получил название «метод главных изгибов» [50]. Этот метод доработал А.А. Курдюмов [27], он предложил применить к интегрированию уравнений И.Г.

Бубнова метод разложения в ряды, ранее предложенный академиком Н.А. Крыловым для расчёта балок, лежащих на упругом основании [26]. В дальнейшем этот метод применялся и развивался в задачах статики и динамики судовых перекрытий.

С.П. Тимошенко, применив теорию анизотропных пластин [72] и метод Ритца [73], внес значительный вклад в развитие методов расчёта. Метод Ритца-Тимошенко продолжил свое развитие в работах некоторых авторов по статике и динамике перекрёстных систем, увеличением выбора аппроксимирующих функций в зависимости от граничных условий [46].

В своей работе С.П. Тимошенко использует замену балочной решетки эквивалентной анизотропной пластинкой с упругими параметрами, «размазанными» по поверхности, ограниченную тем же контуром. Данный метод является приближенным и даёт хорошие результаты лишь при частом расположении балок как одного, так и другого направления.

Численные методы в отличии от вариационных методов расчёта перекрёстных систем нашли широкое применение лишь в последние десятилетия. Метод расчёта, разработанный Ф. Блейхом и Е. Меланом [5] с использованием частных уравнений в конечных разностях, является точным при учете основных допущений строительной механики. При этом стоит отметить, что он достаточно сложен и трудоёмок. М.Ш. Минцковский опираясь на дискретные тригонометрические функции в виде одинарных синусоидальных рядов и решения системы конечно-разностных уравнений в общем виде, предложил метод приложения конечно-разностного аппарата к инженерному расчёту перекрёстных ферм [46]. Это привело к упрощению и повышению точности расчёта. Данные результаты были получены для регулярной шарнирно-опертой системы перекрёстных балок под действием поперечной узловой и продольной нагрузки.

В сочетании с вариационными принципами механики, а также методами сил и перемещений, аппарат конечно-разностного исчисления позволил

ученым достигнуть точных решений для перекрёстных шарнирно-опертых систем с учётом кручения как регулярных, так и бирегулярных. Метод обобщённых сил и обобщённых перемещений представлен в монографии В.А. Игнатьева [14].

Сложности вычислительного характера при решении большого количества систем линейных уравнений, сдерживало развитие метода расчёта сложных статически неопределимых систем. Эту проблему удалось решить с появлением ЭВМ, что позволило значительно расширить область применения методов строительной механики и теории упругости, открыло возможность широкого применения, удобного для записи в табличной форме и общения с машинами матричного аппарата при расчёте подобных систем.

С распространением ЭВМ становился все более популярным в инженерных расчётах метод статического и динамического расчёта различных ребристых конструкций и сооружений – методом конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений, сил или смешанного.

При конструировании перекрёстных балок из клееной древесины на стадии вариантного проектировании, применялись таблицы [62], позволяющие приближенно определить расчётные узловые моменты и прогибы узлов для треугольных в плане покрытий, с различной жесткостью балок того и другого направления. В первом случае для равномерной поперечной нагрузки при составлении таблиц использована дискретная расчётная схема (метод сил), во втором случае выполнен известный подход к расчёту СПБ, основанный на замене реальной конструкции сплошной упругой системой (при «размазывания» материала балок). Также составлены таблицы для равномерной и сосредоточенной нагрузок.

Стоит отметить, что в системах перекрёстных балок, выполненных из отдельных элементов, объединяющихся между собой в узлах с помощью податливых связей, невозможно с помощью этих методов выявить влияние

жёсткости узловых соединений на распределение усилий в элементах и общую деформативность конструкций.

Совершенствованием методов расчета элементов из цельной и клееной древесины сплошного и составного сечений на основе комплексного исследования напряженно деформированного состояния при статических и циклических нагружениях в последние годы занимается А.А. Сморчков [65…67].

Как отмечено выше, в расчёте конструкций обычно оперируют с идеализированными расчётными схемами, при которых элементы между собой соединяются либо абсолютно жестко, либо шарнирно. В реальных конструкциях соединения элементов из дерева (кроме клеевых) являются упруго-податливыми и не всегда могут быть заменены идеальными.

Б.В. Лабудиным был предложен способ расчёта СПБ с учётом податливости узлов методом конечных элементов.

В изгибаемых системах деформативность характеризуется коэффициентом жёсткости С и определяется как отношение действующего в узле изгибающего момента М к величине угла θ между нормалями концов соединяемых элементов (рисунок 1.2).

$$C = \frac{M}{\theta} \quad , \quad H \cdot м \tag{1.1}$$

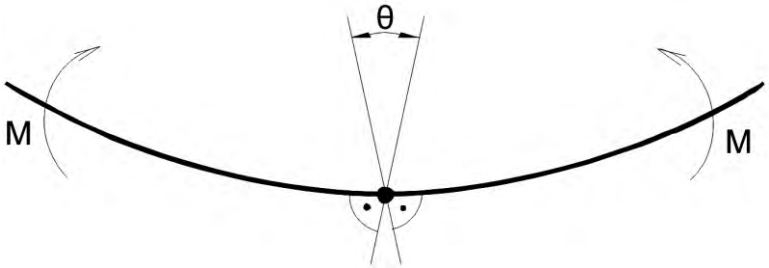


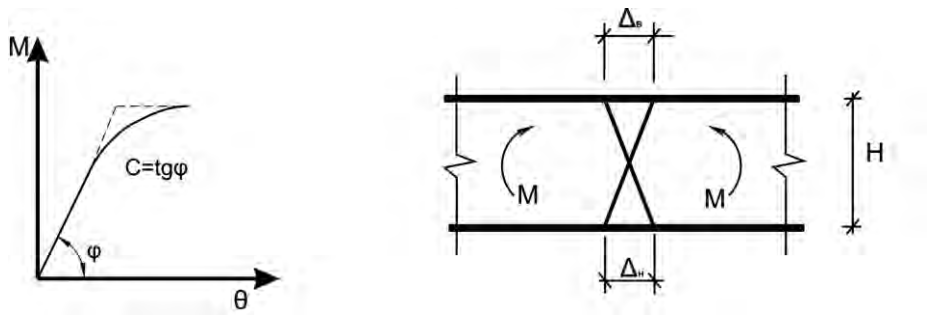
Рисунок 1.2 – Изгибаемая система и учёт податливости

Численные значения коэффициентов жёсткости в каждом конкретном случае устанавливаются индивидуально и зависят от конструкции узла и вида применяемых связей.

В общем случае они будут находиться в пределах от 0 (идеальный шарнир) до ∞ (абсолютно жёсткое соединение), и их учёт важен для статически неопределимых систем, какими являются перекрёстно балочные системы.

При нахождении жёсткости связей следует использовать характеристики деформативности соединений деревянных конструкций, которые могут быть найдены опытным путем или взяты из норм [69]. Для получения обобщенного значения коэффициента жёсткости узла необходимо осуществить переход от линейных деформаций податливости в связях сжатой и растянутой зон к угловой, используя формулу (1.2), и затем подставить полученное значение в (1.1). При этом работа связей в пределах расчётных нагрузок принимается линейно-упругой. Тогда значение коэффициента жёсткости будет выражаться тангенсом угла наклона зависимости «изгибающий момент – угловая деформация» (рисунок 1.3).

$$\theta = \frac{\Delta_в - \Delta_н}{h} \tag{1.2}$$



а) б)

Рисунок 1.3 – График изменения коэффициента жёсткости в зависимости от изгибающего момента и угловых деформаций (а); определение угла θ (б)

Расчётную схему конструкции с упруго-податливыми связями удобно представить стержневой моделью с жёсткими узлами, к которым через упругие шарниры примыкают сами стержни. Тогда число неизвестных метода перемещений останется неизменным.

При расчёте конструкций в матричной форме все исходные данные представляются в виде матриц. Упругие свойства стержней или отдельных элементов, на которые разбивается конструкция, описываются обычно матрицей податливости δ_∂ или матрицей жёсткости r_∂. Эти матрицы дают соотношение между усилиями S_∂ и перемещениями V_∂ по направлению усилий в рассматриваемой системе. Вывод матрицы податливости и матрицы жёсткости прямолинейного стержня постоянного сечения с идеализированными закреплениями концов при изгибе и кручении в общем виде дается в [44].

При выводе аналогичных матриц с упруго-податливыми закреплениями концов полагают, что поперечные и продольные силы на углы поворота опорных сечений не влияют; материал стержней и связей линейно-упругий и деформации линейно связаны с прикладываемой нагрузкой. При изгибе справедлива гипотеза плоских сечений Бернулли, при кручении соблюдается принцип Сен-Венана.

Рассмотрим произвольный стержень (обозначим его индексом *д*) с упруго-податливыми связями, к концам которого приложены независимые силы S, деформирующие ось стержня и вызывающие деформацию внутренним образом примыкающих к концам этого стержня шарниров в виде раскрытия их на угол θ.

Будем учитывать, что углы поворота и моменты положительны, если направления их векторов совпадают с направлением соответствующих осей. Положительными также будут моменты, если они вращают концы стержней по ходу часовой стрелки.

В соответствии с принципом независимости действия сил и учётом принятых допущений можно записать концевые перемещения стержня с упруго-деформируемыми связями (рисунок 1.4) в виде:

$$\begin{aligned} \upsilon_\partial^i &= \upsilon_\partial^{*i} + \theta_\partial^i \\ \upsilon_\partial^j &= \upsilon_\partial^{*j} + \theta_\partial^j \end{aligned} \qquad (1.3)$$

где υ_∂– угловые перемещения концов стержня с упруго-податливыми связями от момента S_∂; υ_∂^*– угловые перемещения концов стержня с жёсткими узлами от момента S_∂^*; θ_∂ – деформация упруго-податливых связей от момента $S_\partial = S_\partial^*$.

Формулу (1.3) с учётом формулы (9) в [44] (1.1) запишем, связав коэффициенты податливости δ концов и усилия S:

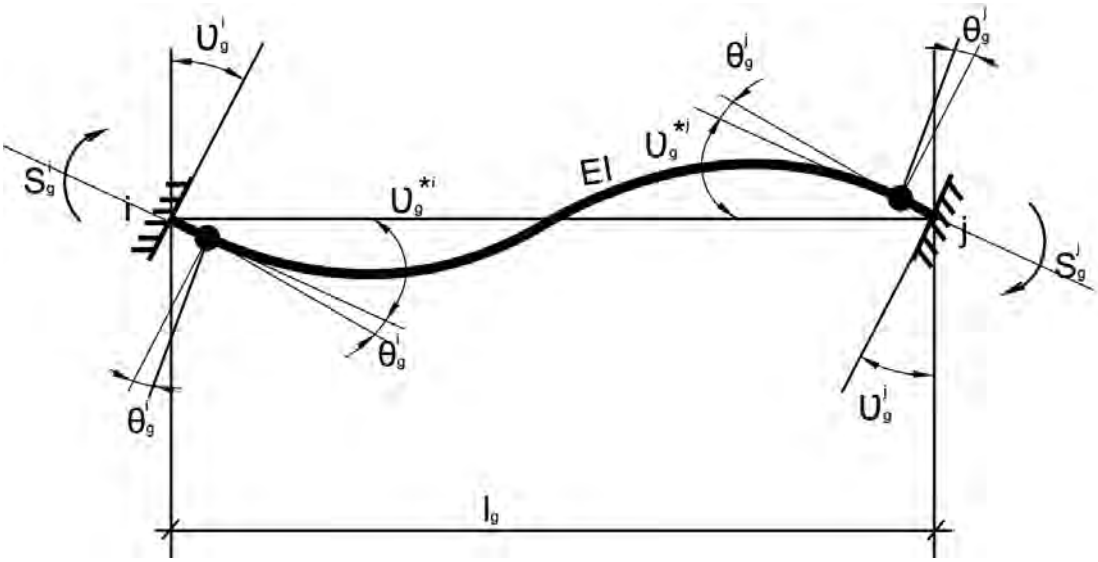


Рисунок 1.4 – Концевые перемещения стержня с упруго-деформируемыми связями

$$\upsilon_\partial^i = \delta_{ii} \cdot S_\partial^i + \delta_{ij} \cdot S_\partial^j + \frac{S_\partial^i}{C^i} \tag{1.4}$$

$$\upsilon_\partial^j = \delta_{ji} \cdot S_\partial^i + \delta_{jj} \cdot S_\partial^j + \frac{S_\partial^j}{C^j}$$

В матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \upsilon_\partial^i \\ \upsilon_\partial^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{ii}\delta_{ij} \\ \delta_{ji}\delta_{jj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_\partial^i \\ S_\partial^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C^i} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C^j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_\partial^i \\ S_\partial^j \end{bmatrix} \tag{1.5}$$

или:

$$V_\partial = \delta_\partial^* \cdot S_\partial + \nu \cdot S_\partial = \left[\delta_\partial^* + \nu\right] \cdot S_\partial = \delta_\partial \cdot S_\partial$$

Таким образом,

$$\underline{\delta}_g = \underline{\delta}_g^* + \underline{\nu} \tag{1.6}$$

Здесь $\underline{\delta}_g$ – матрица податливости прямолинейного стержня постоянного сечения с упруго-податливыми связями при изгибе его в одной из главных плоскостей инерции порядка 2×2. Она образуется простым суммированием матрицы податливости $\underline{\delta}_g$* стержня с жёсткой заделкой и матрицы, состоящей из коэффициентов податливости $\underline{\nu}$ упругих связей. Последняя приводится к виду, удобному для сложения, путем умножения и деления коэффициентов жёсткости связей на погонную жёсткость стержня, то есть $j = \frac{\varepsilon I}{l}$. Тогда:

$$\underline{\nu} = \frac{1}{j}\begin{bmatrix} \frac{\varepsilon I}{lC^i} & 0 \\ 0 & \frac{\varepsilon I}{lC^j} \end{bmatrix} = \frac{1}{j}\begin{vmatrix} \nu^i & 0 \\ 0 & \nu^j \end{vmatrix} \tag{1.7}$$

Матрица жёсткости данного стержня с упруго-податливыми связями получается преобразованием матрицы податливости (1.6) Для этого умножим числитель и знаменатель её на r_g^* - матрицу жёсткости стержня с жёсткой заделкой.

$$r_g = \delta_g^{-1}$$

Тогда:

$$\left|\underline{\delta}_g^* + \underline{\nu}\right|^{-1} = \frac{\underline{E}}{\underline{\delta}_g^* + \underline{\nu}} = \frac{\underline{E} \cdot \underline{r}_g}{\underline{r}^* \left[\underline{\delta}_g^* + \underline{\nu}\right]} = \frac{\underline{E} \cdot \underline{r}_g}{\underline{E} + \underline{r}_g^* \cdot \underline{\nu}} = \left[\underline{E} + \underline{r}_g^* \cdot \underline{\nu}\right]^{-1} \cdot \underline{r}_g^* \tag{1.8}$$

Таким образом, соотношение между усилиями и перемещениями на концах упруго-защемлённого стержня запишутся:

$$\underline{V}_g = \underline{\delta}_g \cdot \underline{S}_g = \left[\underline{\delta}_g^* + \underline{\nu}\right] \cdot \underline{S}_g \tag{1.9}$$

$$\underline{S}_g = \underline{r} \cdot \underline{V}_g = \left[\left[\underline{E} + \underline{r}_g^* \cdot \underline{\nu}\right]^{-1} \cdot \underline{r}_g^*\right] \cdot \underline{V}_g \tag{1.10}$$

Матрицы податливости $\underline{\delta}_g$ и жёсткости $\underline{r}_g$ для стержня с упруго-податливыми защемлениями концов получаются из известных матриц податливости δ_g^* и жёсткости r_g^* для того же стержня с жёсткими

защемлениями и матрицы податливости ν упругих связей по концам, значения которых можно получить экспериментально.

Окончательно, с учётом того, что:

$$\underset{-}{\delta}^{*}_{g} = \frac{1}{6j}\cdot\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}; \qquad \underset{-}{r}^{*}_{g} = 2j\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}; \tag{1.11}$$

$$\underset{-}{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \qquad \underset{-}{\nu} = \frac{1}{j}\begin{bmatrix} \nu_i & 0 \\ 0 & \nu_j \end{bmatrix}; \tag{1.12}$$

$$j = \frac{\varepsilon \cdot I}{l}; \qquad \nu = \frac{\varepsilon \cdot I}{l \cdot O}. \tag{1.13}$$

по (1.9) и (1.10) получим искомую матрицу податливости и матрицу жёсткости стержня с упруго-податливыми связями:

$$\underset{-}{\delta}_{g} = \frac{1}{6j}\cdot\begin{bmatrix} 2(1+3\nu_i) & -1 \\ -1 & 2(1+3\nu_j) \end{bmatrix}; \tag{1.14}$$

$$\underset{-}{r}_{g} = 2\cdot j\cdot\Delta\begin{bmatrix} 2(1+3\nu_j) & 1 \\ 1 & 2(1+3\nu_i) \end{bmatrix}. \tag{1.15}$$

При этом коэффициенты матрицы жёсткости (1.15) совпадают с полученными в [90], но вывод ее значительно упростился и приобрел ясный физический смысл.

С учётом кручения матрицу жёсткости стержня с упруго деформируемыми узлами можно записать, используя [44] и [93],

$$\underset{-}{r}_{g} = \Delta\cdot\frac{\varepsilon I}{l}\begin{vmatrix} 4(1+3\nu_j) & 2 & 0 \\ 0 & 4(1+3\nu_i) & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{\Delta^{\rho}\cdot GI^{\rho}}{\Delta\cdot\varepsilon I} \end{vmatrix}, \tag{1.16}$$

где:

$$\Delta = \frac{1}{1+4(\nu_i+\nu_j)+12\nu_i\cdot\nu_j};$$

$$\Delta^{\rho} = \frac{1}{1+\mu_i+\mu_j}; \qquad \mu = \frac{GI^{\rho}}{l\cdot C^{\rho}};$$

С – коэффициент жёсткости узла при изгибе ($C = \frac{M}{\theta}$);

$C^{р}$– коэффициент жёсткости узла при кручении ($C^{\rho} = \frac{M^{kp}}{\theta^{kp}}$).

Задачей динамического расчёта систем перекрёстных балок является определение амплитуды динамических усилий и проверка несущей способности элементов конструкции с учетом усилий от статических нагрузок, и определение амплитуды вынужденных колебаний системы. Совместные статические и динамические нагрузки вызывают в конструкциях соответствующие усилия и перемещения.

Существуют два метода исследования конструкций: экспериментальный и теоретический. При теоретическом исследовании учитываются аналитические и численные способы определения амплитуд вынужденных колебаний и частот свободных колебаний системы. При экспериментальном методе посредством испытаний на действующих конструкциях и на моделях учитывают динамические, сейсмические и ветровые нагрузки на конструкцию.

Вид нагрузки и расчётной схемы конструкции определяет выбор метода исследования. Динамические нагрузки бывают: детерминированные, изменяющиеся во времени по определённому закону, и случайные, изменяющиеся во времени незакономерно. Способы нахождения частот и форм колебаний зависят только от расчётной схемы конструкции. До динамического расчёта можно предугадать, как будут выглядеть вынужденные колебания, зная частоты и формы соответствующих колебаний конструкции. Это позволяет упростить расчёт и определить наихудшие значения частот периодических нагрузок и продолжительности кратковременных нагрузок.

При расчёте систем с несколькими степенями свободы нужно записать столько дифференциальных уравнений движения, сколько имеется независимых координат. Осуществляя динамический расчёт конструкции

следует располагать собственной частотой и периодом колебания системы. Затухание при нахождении частот и периодов свободных колебаний системы можно не учитывать, так как оно влияет на величину амплитуд, а на частотах и периодах отражается незначительно.

Уравнением Лагранжа можно описать движение любой системы. Ниже приведён вывод уравнений для системы с одной обобщенной координатой и скоростью. Будем считать, что вариация на границах равно нулю:

$$\delta q\,(t_1) = \delta q\,(t_2) = 0. \tag{1.17}$$

Изменение действия при переходе из состояния t_1 в t_2 есть

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2} L(q + \delta q, \dot{q} + \delta\dot{q}, t)\,dt - \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t)\,dt \tag{1.18}$$

Разлагая эту разность по степеням, получим

$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t)\,dt \tag{1.19}$$

Варьируя это выражение, получаем:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q}\delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\delta\dot{q}\right) dt = 0 \tag{1.20}$$

Замечая, что $\delta\dot{q} = \frac{d}{dt}\delta q$, проинтегрируем второй член по частям:

$$\delta S = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\delta q\Big|_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right)\delta q\,dt = 0 \tag{1.21}$$

Первое слагаемое равно нулю исходя из (1.17). Второе слагаемое может быть равно нулю, только если подынтегральное выражение равно нулю. Таким образом, получаем искомое уравнение Лагранжа:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \tag{1.22}$$

1.3 Методы динамического контроля качества перекрёстных систем. Применение вибрационных методов для оценки жёсткости строительных конструкций

Проблема контроля качества строительных конструкций в наше время становится все острее. Это обосновывается ростом потребительских запросов и высокой конкуренцией на строительном рынке, необходимостью

реконструировать оставшиеся со времен СССР здания и сооружения при изменившейся нормативной базе.

В контроле качества строительных конструкций можно выделить три условных направления:

1. Контроль качества конструкций во время производства для установления соответствия свойств нормативным показателям.

2. Установление действительной несущей способности конструкций при реконструкции зданий и сооружений, а также при усилении конструкций.

3.Уточнение расчётных схем эксплуатируемых конструкций.

Первое направление – контроль качества конструкций во время производства может проверяться на специальном стенде завода, на котором они производятся, что не составляет особой сложности и не входит в цели данного исследования. Остановимся более подробно на последних двух направлениях.

При реконструкции и капитальном ремонте зданий и сооружений пользуются вибрационными методами для определения фактической несущей способности конструкции. Применение идеализированных расчётных схем при статическом методе расчёта конструкции не всегда даёт возможность указать фактическую схему опирания и схемы расчётных нагрузок.

В основном перед реконструкцией зданий или сооружений выполняют комплексное обследование объекта. Действительную несущую способность конструкций обычно устанавливают при проведении ряда исследований, включающих определение физико-механических свойств строительных материалов, составление дефектных ведомостей конструкций, обмерные работы, определение диаметра, расположения арматуры, толщины защитного слоя, параметров сварных швов, наличие и расположение монтажных метизов, схему приложения и интенсивность нагрузок и т.п. По результатам данных обследований проводятся поверочные расчёты с учётом всех

дефектов, влияющих на прочностные характеристики конструкций и в зависимости от величины максимальной нагрузки судят о действительной несущей способности. Этот подход оправдан в тех случаях, когда рассчитываемая конструкция имеет известную расчётную схему с чёткими граничными условиями. При неучёте фактических условий опирания конструкции данные поверочных расчётов могут быть как завышены, так и занижены по сравнению с реальной ситуацией.

Также важнейшей задачей, решаемой с помощью вибрационных методов, является установление действительных расчётных схем эксплуатируемых конструкций. Данным вопросом занимались В.И. Коробко, А.В. Турков, А.П. Юров, П.А. Гвозков, М.О. Калашников, В.И. Поляков, Д.И. Красильников [9,21,22,64,76,77].

При составлении расчётных схем в качестве граничных условий используют шарнирное опирание и жёсткое защемление элементов. Стоит отметить, что в реальных условиях оба способа крепления элементов очень сложно реализовать.

Шарнирное крепление элементов подразумевает собой отсутствие, сопротивления повороту сечения в узле. В реальности этому условию мешают следующие причины: трение в шарнире, дополнительные связи в узле, мешающие свободному повороту сечения в узле. Вследствие этого в опоре возникают изгибающие моменты, влияющие на напряженно-деформированное состояние узла и конструкции в целом.

Жёсткое сопряжение элементов предполагает отсутствие в узле поворота сечения. В реальности данное условие сопряжения также сложно реализовать, особенно для деревянных конструкций. Не учёт для конструкций, выполненных из железобетона и металла, не так критичен из-за высокого сопротивления смятию контактируемых поверхностей, а также благодаря большему значению модуля упругости.

При выполнении строительных конструкций из древесины следует учитывать податливость узловых соединений. Деревянные конструкции имеют невысокий модуль упругости (порядка 10000 МПа вдоль волокон) и низкое расчётное сопротивление смятию поперек волокон ($R_{см90}$ = 2,4 Мпа), что не позволяет реализовать жёсткие узлы. На степень податливости влияют: конструкционное выполнение узла, вид связей, направления усилий смятия относительно направления волокон, площади смятия и т.д. Степень податливости узлов статически неопределимых систем может повлиять на перераспределение усилий в системе.

Применение вибрационного метода позволяет по динамическим характеристикам конструкции определить податливость узловых соединений элементов. Обычно для конструкций при неопределенности расчётных схем фактическая несущая способность устанавливается путем испытаний конструкций статическими методами. Отметим некоторые сложности при реализации этих методов:

- испытания занимают достаточно много времени, в промышленных зданиях выделение временных промежутков приведет к остановке технологического процесса, что не всегда является возможным. В случае принятия решения об проведении испытания, предприятие несет материальные потери из-за остановки производственного процесса;

- исследования и цикл подготовительных работ очень трудоёмки, занимают много времени.

Сложности, возникающие при регистрации характеристик напряжённо-деформированного состояния конструкций или их отдельных элементов, являются наибольшими. Нагрузки на эксплуатируемые конструкции близки к расчётным, следовательно, величина испытательной нагрузки мала и, как правило, суммарная нагрузка на конструкцию – эксплуатационная плюс испытательная – не должна превышать расчётную. В случае малых испытательных нагрузок устанавливаются повышенные требования к

точности датчиков и регистрирующей аппаратуры, применяют большое количества дублирующих датчиков, различные типы датчиков используют для измерения одних и тех же параметров, применяют различные методы измерения параметров. В некоторых случаях статические испытания становятся невозможными по той причине, что нельзя приложить сколько-нибудь значительную испытательную нагрузку, при которой надёжно регистрируются параметры напряженно-деформированного состояния конструкций.

Также стоит обратить внимание на то, что при нагрузках, близких к расчётным, возможно проявление скрытых дефектов, не обнаруженных при осмотре и инструментальном обследовании. Тогда могут произойти пластические деформации материала, влекущие к недопустимым перемещениям, при этом восстановить конструкцию в проектном положении практически невозможно. В худшем случае, возможно хрупкое (мгновенное) разрушение конструкции с обрушением. В любом случае перегрузка конструкций при испытаниях нежелательна; при неопределённой расчётной схеме, когда невозможно точно установить расчётные нагрузки, такое развитие событий вполне вероятно.

Обозначенные выше недостатки статических испытаний можно избежать путём применения динамических испытаний, при которых определяются такие динамические параметры конструкций, как амплитуда, форма и частота колебаний. Существуют различные вибрационные методы, которые отличаются между собой по способу возбуждения колебаний, среди которых известны:

- способ гармонических колебаний, когда изменение частоты происходит в достаточно широком диапазоне и когда в процессе испытаний, как правило, ограничиваются получением амплитудно-частотной характеристики изделий для конкретной исследуемой формы колебаний;

- способ свободных затухающих колебаний, возбуждаемых ударом или начальным смещением от положения равновесия, когда динамические параметры изделий определяются из полученной записи виброграмм (осциллограмм) колебаний;

- способ вынужденных колебаний в переходном режиме при пуске (остановке) оборудования или воздействии специального возбудителя гармонических колебаний, когда результаты испытаний позволяют приближенно определять значения собственных частот колебаний исследуемых конструкций.

Метод свободных колебаний является самым простым и доступным в реализации, что и определяет более широкие возможности его использования при организации испытаний строительных конструкций на месте, которые в эксплуатационных условиях работают на изгиб или могут подвергаться динамическим испытаниям по изгибной форме колебаний.

В ходе испытаний в конструкции возбуждают свободные затухающие колебания путем нанесения удара незначительной мощности, которые регистрируют в виде виброграмм при помощи специальных устройств. Записи колебаний конструкции расшифровывают и определяют период свободных колебаний, затем вычисляется динамический модуль упругости материала конструкции. После этого устанавливается фактическая жёсткость элемента. По жёсткости устанавливают качество и надёжность конструкции по прочности, жёсткости и трещиностойкости.

1.4 Направление и задачи исследования

Изложенные выше проблемы свидетельствуют об актуальности оценки динамических и статических характеристик систем перекрёстных балок с учётом податливости узловых соединений.

Еще одной задачей при проектировании, усилении и обследовании является определение фактической податливости узловых соединений

конструкции, а также выявление фактических граничных условий системы. В статически неопределимых системах выявление характера перераспределения усилий, вызванное податливостью узловых соединений, является важным направлением исследования.

Точных методов решения задач, направленных на определение собственных частот колебаний систем перекрёстных балок, мало, и они определяются, в основном, приближёнными численными методами. Испытания статическими методами, проходящие на эксплуатируемых объектах влечёт проведение длительного цикла подготовительных работ и ведёт к остановке технологического цикла.

Фундаментальная зависимость, выведенная д.т.н. профессором В.И. Коробко позволила проводить подобные исследования. В основе метода лежит функциональная взаимосвязь между максимальным прогибом от действия равномерно распределённой нагрузки на конструкции и их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии. Фундаментальная зависимость распространяется на изотропные сплошные пластины. Для возможности применения этой зависимости к системам перекрёстных балок необходимо проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований.

Основной **целью** данного научного исследования является теоретические и экспериментальные исследования деформативности систем перекрёстных балок из деревянных клееных элементов при статическом и динамическом нагружении с учетом податливости соединений при изменении размеров ячеек, схемы опирания и включением в работу элементов покрытия.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- определить влияние податливости узловых соединений элементов, схемы опирания конструкции, включение в работу СПБ покрытия на

максимальный прогиб и основную частоту собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном и треугольном плане;

- установить взаимосвязь между максимальными прогибами и собственными частотами поперечных колебаний систем перекрёстных балок из деревянных клееных элементов;

- разработать и изготовить стенд для проведения экспериментальных исследований систем перекрёстных балок;

- провести серию экспериментальных исследований систем перекрёстных балок с изменением жёсткости узловых соединений, схемы опирания, размеров ячеек, включения в работу элементов покрытия.

2 ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА И СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ ПЕРЕКРЁСТНЫХ БАЛОК НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ

2.1 Функциональная связь максимального прогиба упругих балок и пластинок с их основной частотой колебаний

Интегрирование дифференциальных уравнений частот и прогибов системы, позволяет определить деформационные параметры. В.И. Коробко была выведена закономерность, которая, доказывает наличие связи максимального прогиба и частоты собственных поперечных колебаний упругих изотропных пластинок [19, 20, 23, 24].

Дифференциальное уравнение поперечного изгиба пластинки можно записать следующим образом:

$$D\left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 W}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 W}{\partial y^4}\right)-q(x,y)=0. \qquad (2.1)$$

При задействовании бигармонических операторов уравнение примет вид:

$$D\Delta^2\Delta^2 W-q(x,y)=0, \qquad (2.2)$$

где W = W(x,y) – функция прогибов пластинки при поперечном изгибе; $\Delta^2\Delta^2$ – бигармонический оператор; $D = EH^3/(12(1-\nu^2))$ – цилиндрическая жёсткость пластинки; q(x,y) – закон изменения поперечной нагрузки.

Дифференциальное уравнение свободных колебаний пластинки можно представить:

$$D\left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 W}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 W}{\partial y^4}\right)+m\frac{\partial^2 W}{\partial t^2}=0; \qquad (2.3)$$

$$D\Delta^2\Delta^2 W+m\frac{\partial^2 W}{\partial t^2}=0. \qquad (2.4)$$

где W = W(x,y,t) – функция прогибов свободно колеблющейся пластинки; m – масса единицы площади пластинки; E, ν – соответственно модуль упругости материала и коэффициент Пуассона.

При условии что колебания гармонические

$$W = W(x,y)\cos(\omega t)\ , \qquad (2.5)$$

тогда выражение (2.1) можно представить следующим образом:

$$D\Delta^2\Delta^2 W - m\omega^2 W = 0$$

или

$$D\Delta^2\Delta^2 W - \beta^2 W = 0,$$

где $\beta^2 = m\omega^2/D$ – собственное значение дифференциального уравнения колебаний пластинок.

Запишем функцию прогибов, как произведение максимального прогиба W_0 и единичной функции f(x,y). Включив данную функцию в дифференциальные уравнения поперечного изгиба и свободных колебаний пластинок получим:

$$W(x,y) = W_0 f(x,y)\ ;$$

$$\begin{cases} DW_0\Delta^2\Delta^2 f - q(x,y) = 0, \\ D\Delta^2\Delta^2 f + \omega^2 m f = 0. \end{cases} \qquad (2.6)$$

Необходимо отметить, что точное решение данных дифференциальных уравнений распространяется на частые случаи форм пластинок и граничных условий, из этого следует, что на практике в основном используются приближенные методы решения.

Если представить, что пластинка находится под, равномерно распределённой нагрузкой q, то проинтегрировав уравнения (2.6) по всей площади области, и произведя ряд математических действий, запишем:

$$W_0 = \frac{q}{D}\frac{A}{\iint\limits_A \Delta^2\Delta^2 f dA}, \qquad \omega^2 = \frac{D}{m}\frac{\iint\limits_A \Delta^2\Delta^2 f dA}{\iint\limits_A f dA}. \qquad (2.7)$$

Представим функцию прогибов W(x,y) в однопараметрическом виде в полярной системе координат:

$$W(x,y) = W_0 f(x,y) = W_0 g\left[\frac{t}{r(\varphi)}\right] = W_0 g(\rho)\ , \qquad (2.8)$$

где $r = r(\varphi)$ – уравнение контура пластинки в полярной системе координат, t и φ – полярные координаты, $\rho = t/r(\varphi)$ – безразмерная полярная координата.

Функцию прогибов W(x,y) описывает область, линии уровня которой можно представить как контур поверхности. Представление функции проги-

бов таким образом оправдано тем, что благодаря этому можно представить решение поперечного изгиба эллиптической пластинки при действии равномерно распределённой нагрузкой с жестким защемлением по краям. Поскольку лишь в одном случае представляется возможным записать действительную функцию прогибов в виде однопараметрической функции (2.8), то последующие расчеты имеют приближённый вид.

Преобразуем интегралы, входящие в выражения (2.7), с учетом задания функции прогибов в виде (2.8).

$$\iint_A f dA = \int_0^{2\pi}\int_0^{r} g(\rho) t dt d\varphi. \tag{2.9}$$

Умножив и поделив правую часть на r^2, то после преобразований получим:

$$\iint_A f dA = 2A\int_0^1 g(\rho)\rho d\rho. \tag{2.10}$$

Преобразуем интеграл от бигармонического оператора по [84]:

$$I \approx \left(K_f{}^2\Phi_{g1} + K_f\Phi_{g2}\right)/2 = K_f\left(K_f\Phi_{g1} + \Phi_{g2}\right)/A\ . \tag{2.11}$$

Где

$$\begin{aligned} \Phi_{g1} &= \frac{1}{2}\int_0^1\left(g^{IV}\rho - 12g''' - 21g''\rho^{-1} - 3g'\rho^{-2}\right)d\rho, \\ \Phi_{g2} &= \frac{\pi}{2}\int_0^1\left(2g^{IV}\rho + 14g''' + 22g''\rho^{-1} + 3g'\rho^{-2}\right)d\rho, \end{aligned} \tag{2.12}$$

Знак приближённого равенства в (2.11) появился при преобразовании интегралов с помощью неравенства Буняковского [3].

Подставим в выражения (2.6) интегралы (2.10) и (2.11). После необходимых преобразований получим:

$$\begin{cases} W_0 \approx \dfrac{qA^2}{D}\dfrac{1}{K_f{}^2\Phi_{g1} + K_f\Phi_{g2}}, \\ \omega^2 \approx \dfrac{D}{2A^2m}\dfrac{K_f{}^2\Phi_{g1} + K_f\Phi_{g2}}{\int_0^1 g\rho d\rho} \end{cases} \tag{2.13}$$

Ввиду того, что значения интегралов выражения (2.13) являются числами, зависящими от точности выбора функции g(ρ), то представим их в качестве коэффициентов пропорциональности K_w, K_ω и B:

$$W_0 = K_w \frac{q}{D} \frac{A^2}{K_f{}^2 + BK_f}, \qquad \omega^2 = K_\omega \frac{D}{m} \frac{K_f{}^2 + BK_f}{A^2}, \qquad (2.14)$$

где $$K_w = 1/\Phi_{g1}; \quad K_\omega = \frac{1}{2}\Phi_{g1} \Big/ \int_0^1 g\rho d\rho; \quad B = \Phi_{g2}/\Phi_{g1}.$$

Строго говоря, в формулах (2.14) следует поставить знаки приближённых равенств, ввиду (2.12) и приближённости задания функции g(ρ).

Умножим равенства (2.14) друг на друга:

$$W_0\omega^2 = K_w K_\omega \frac{q}{m} = K\frac{q}{m}. \qquad (2.15)$$

Учитывая, что коэффициенты K_w и K_ω зависят от формы пластинки, то из выражения (2.15) можно получить следующую закономерность: *для упругих изотропных пластинок одинаковых форм с однородными граничными условиями произведение максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределённой нагрузки q на квадрат их основной частоты поперечных колебаний в ненагруженном состоянии ω^2 с точностью до размерного множителя q/m есть величина постоянная*. Таким образом, математически строго доказано, что для всех пластин с неизменяемыми граничными условиями произведение $W_0 \cdot \omega^2$ будет представляться одной кривой линией. Стоит отметить, что рассматриваемое в данной закономерностипроизведение $W_0 \cdot \omega^2$ не зависит от изгибной жёсткости и размеров конструкций. Формы пластинок могут быть самыми разнообразными – от круглой до бесконечно вытянутой. Вполне уместно ожидать, что граничные значения кривой $K = W_0 \cdot \omega^2$ будут соответствовать именно этим пластинкам.

Рассмотрим таблицы 2.1 и 2.2, где приведены данные по пластинам разных форм, взятые из справочной и научной литературы.

Таблица 2.1 – Сопоставление произведения $W_0 \cdot \omega^2$ для пластинок различных очертаний с жёстко защемленным контуром

Форма пластинки	Максимальный прогиб $w_0 = \alpha \frac{qA^2}{D}$	Основная частота колебаний $\omega = \beta^2 \frac{1}{A}\sqrt{\frac{D}{m}}$	Произведение $w_0\omega^2 = \alpha\beta^4 \frac{q}{m}$
1	2	3	4
Правильные фигуры:			
Квадрат	1,262	35,72	1,610
Треугольник	0,880	42,51	1,590
Прямоугольники:			
a/b = 1	1,262	35,72	1,610
a/b = 2	0,635	49,16	1,535
a/b = 5	0,098	115,6	1,268

Примечания: *1. Коэффициенты пропорциональности α и β^2 приведены к единой площади. Значения параметра α увеличены в 10^3 раз.*

Таблица 2.2– Сопоставление произведения $W_0 \cdot \omega^2$ для пластинок с шарнирно опертым контуром

Форма пластинки	Максимальный прогиб $w_0 = \alpha \frac{qA^2}{D}$	Основная частота колебаний $\omega = \beta^2 \frac{1}{A}\sqrt{\frac{D}{m}}$	Произведение $w_0\omega^2 = \alpha\beta^4 \frac{q}{m}$
Правильные фигуры:			
Квадрат	4,060	19,74	1,582
Треугольник	3,086	22,79	1,603
Прямоугольники:			
a/b = 1	4,060	19,74	1,582
a/b = 1,5	3,431	21,38	1,568
a/b = 2	2,533	24,67	1,542
a/b = 5	0,519	51,32	1,367

Примечания: *1. Коэффициенты пропорциональности α и β^2 приведены к единой площади. Значения параметра α увеличены в 10^3 раз.*

По данным, приведенным в таблицах 2.1 и 2.2 (колонки 4), построена графическая зависимость $W_0 \cdot \omega^2$ –$1/K_f$ (рисунок 2.1), где K_f – коэффициент формы пластинки, характеризующий её «правильность» (или симметричность). Как видно из приведённого рисунка, для рассматриваемого множе-

ства пластинок с различными граничными условиями значения произведения $W_0 \cdot \omega^2$ достаточно строго ложатся на одну плавную кривую.

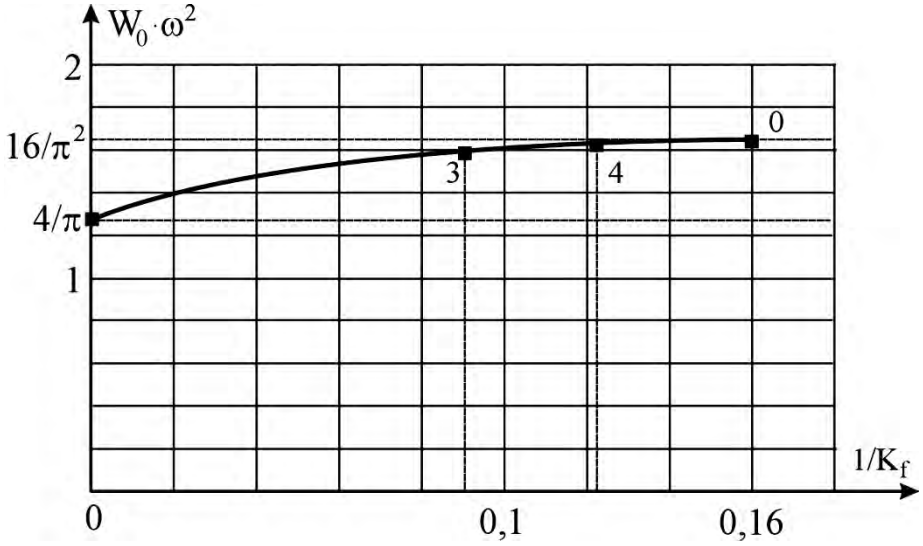


Рисунок 2.1 – Зависимость $W_0 \cdot \omega^2 - 1/K_f$:

т. 3 – пластинка в форме правильного треугольника; т. 4 –пластинка в форме квадрата

Для удобства записи установленной закономерности нижнюю границу коэффициента пропорциональности при произведении $W_0 \cdot \omega^2$ примем приближённо равной $4/\pi = 1{,}2732395\ldots$, что отличается от среднего значения всего на 0,38 %. Верхнюю границу примем равной $(4/\pi)^2 = 1{,}6211389\ldots$, что отличается от соответствующего среднего значения для пластинок круглой формы на 1,07 %.

Исходя из вышеперечисленного опишем закономерность для всех видов пластин. Для упругих изотропных пластинок постоянного сечения с произвольными граничными условиями, произведение максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределённой нагрузки q на квадрат их основной круговой частоты колебаний в ненагруженном состоянии ω^2 ограничено с двух сторон: одна из границ соответствует круглым пластинкам и с точностью до размерного множителя q/m равна $\approx(4/\pi)^2$, а другая соответствует бесконечно вытянутым пластинкам (балкам) и равна $\approx 4/\pi$, с точностью до размерного множителя q/m.

Для пластинок одинаковой формы независимо от вида граничных условий произведение $W_0 \cdot \omega^2$ есть величина постоянная.

$$W_0 \cdot \omega^2 = \text{const}. \qquad (2.16)$$

С помощью данной зависимости можно развивать и улучшать вибрационные методы диагностики и контроля качества строительных конструкций. А также она может найти применение при геометрическом и физико-механическом моделирования строительных конструкций. Доказательством этого служат многочисленные работы, авторские свидетельства и патенты, опубликованные и полученные научным коллективом, возглавляемым профессором В.И. Коробко. Но стоить отметить, что по его мнению, которое он неоднократно озвучивал в научной печати, данная зависимость распространяется лишь на изотропные материалы и конструкции (балки и пластинки) постоянной изгибной жёсткости. Это сильно ограничивает виды конструкций к которым можно применить данную зависимость, так как она не распространяется на анизотропные материалы, в том числе на составные деревянные конструкции. Возможно значительное расширение области применения, закономерности (2.16) для конструкций балочного типа, включая системы перекрёстных балок из клееной древесины.

Однако, стоит учитывать податливость узловых соединений и схему опирания конструкции.

2.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок на квадратном плане

Как отмечалось выше, профессор В.И. Коробко сформулировал фундаментальную закономерность для упругих изотропных пластин постоянной толщины и произвольной формы, которая гласит: вне зависимости от граничных условий произведение максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределённой нагрузки q на квадрат основной частоты колебаний балки в ненагруженном состоянии ω с точностью до размерного множителя q/m есть величина постоянная и соответствует закономерности:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{m}, \tag{2.17}$$

где m – равномерно распределённая по площади масса пластины.

В данном разделе рассматривается применимость этой закономерности для систем перекрёстных балок (СПБ) с упруго-податливыми узлами. По те-

ме данного исследования нами опубликованы ряд научных работ [41, 79, 85].

В качестве расчётной конструкции была принята система перекрёстных балок на квадратном плане 18 × 18 м (рисунок 2.2). Размеры ячеек составляли 1×1м, 1,5×1,5м, 2×2м, 3×3 м, 3,6×3,6м, 4,5×4,5м и 6×6м. Элементы в узлах соединяются между собой с помощью стальных уголков и стальных нагелей (болтов, шпилек, глухарей). Конструкция узла приведена на рисунке 2.3.

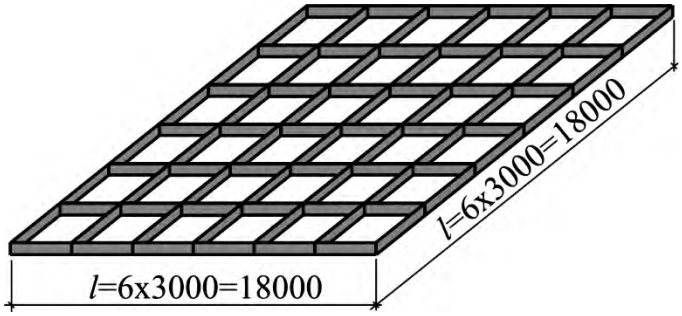


Рисунок 2.2 – Схема системы перекрёстных балок на квадратном плане

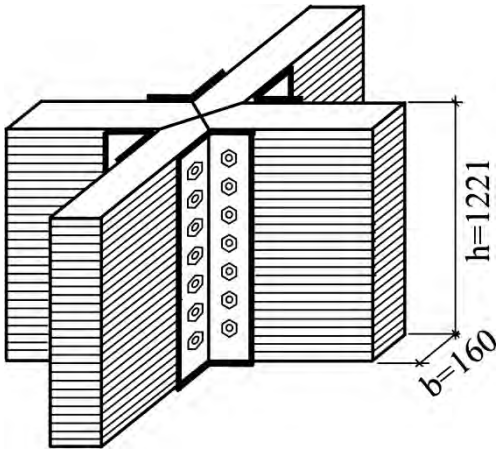


Рисунок 2.3 – Узел примыкания элементов

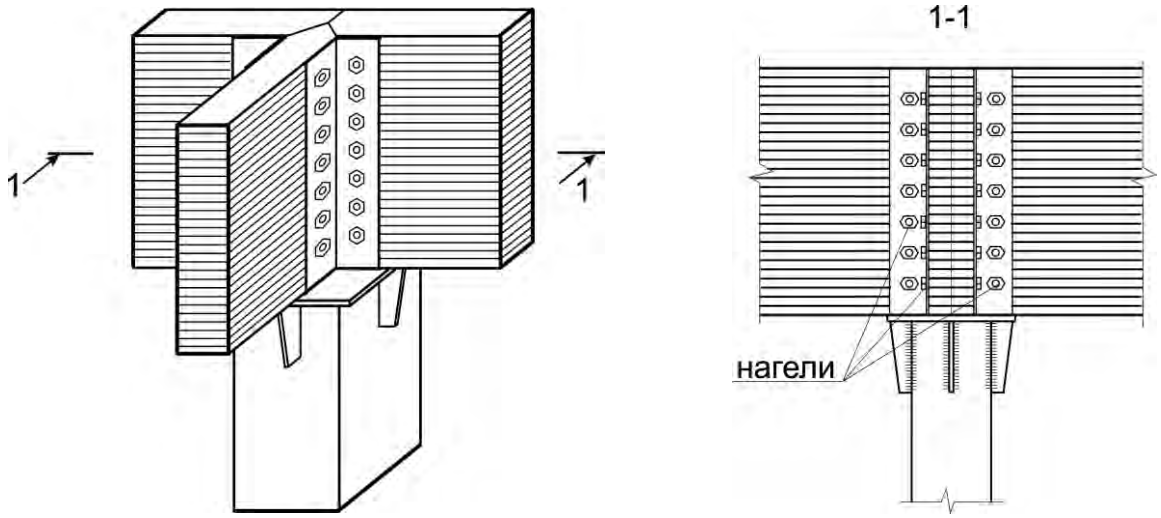


Рисунок 2.4 – Опорный узел примыкания элементов друг к другу

По контуру система перекрёстных балок опиралась в контурных узлах на шарнирные опоры (рисунок 2.4). Постоянная нагрузка составила от покрытия (клеефанерная плита) $q_{покр}$ = 0,156 кН/м^2 и от собственного веса системы перекрёстных балок (сечение дощатоклееных элементов системы принято постоянным b × h = 160 × 1221 мм) $q_{св}$ = 0,187 кН/м^2. Снеговая нагрузка принималась по нормам для Орловской области [68, 70] S_g = 1,8 кН/м^2. Об-

щая равномерно распределённая статическая нагрузка составила q = 2,143 кН/м^2. Для статического расчёта, нагрузка прикладывалась в узлах системы. При определении собственных частот колебаний в узлы системы были приложены сосредоточенные грузы, интенсивность которых была получена по фактическому собственному весу конструкции. Модуль упругости древесины в расчётах принимался по нормам [69, 71] и составил E=10000 МПа.

Для оценки степени влияния податливости узловых соединений разработан элемент с вставками по концам (рисунок 2.5).

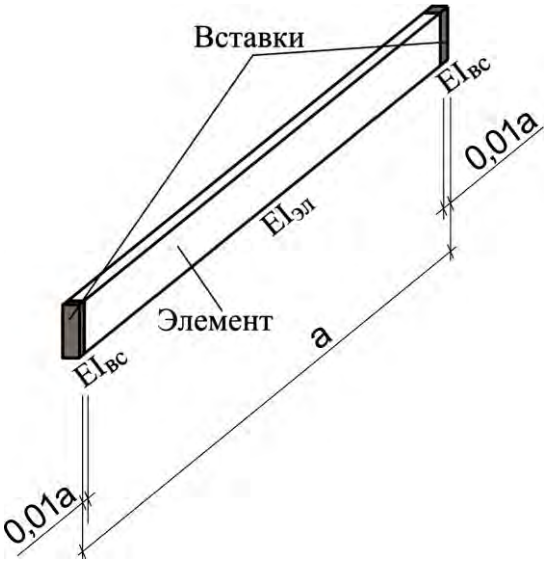


Рисунок 2.5 – Схема элемента СПБ с вставками

Длина каждого элемента равнялась размеру ячейки *a*, длина вставки принята 0,01*a*. Изгибная жёсткость элемента соответствовала жёсткости дощатоклееного сечения b × h =160 × 1221 мм (сечение по высоте набрано из 37 досок толщиной 33 мм), а изгибная жёсткость вставок изменялась в диапазоне $EI_{вс}/EI_{эл}$ от 0 (в практических расчётах принято соотношение 0,0001) до 1. Очевидно, что при соотношении жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{эл}$ = 0 в узлах системы перекрёстных балок образуется шарнир, а при $EI_{вс}/EI_{эл}$ = 1 податливость в узлах отсутствует.

Исследования проводились в программном комплексе SCAD методом конечных элементов. По результатам расчётов определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок. Исследования были выполнены для каждой системы с учётом различных размеров ячеек.

Отклонение фактических значений коэффициента К от теоретического вычислялось по формуле:

$$\Delta = \frac{K_{теор} - K}{K_{теор}} \cdot 100\% . \qquad (2.18)$$

Коэффициент $K_{теор}$ для квадратных пластин, шарнирно опертых по контуру, составляет К=1,582.

2.2.1 Результаты исследований систем перекрёстных балок в зависимости от жёсткости узловых связей и размера ячеек

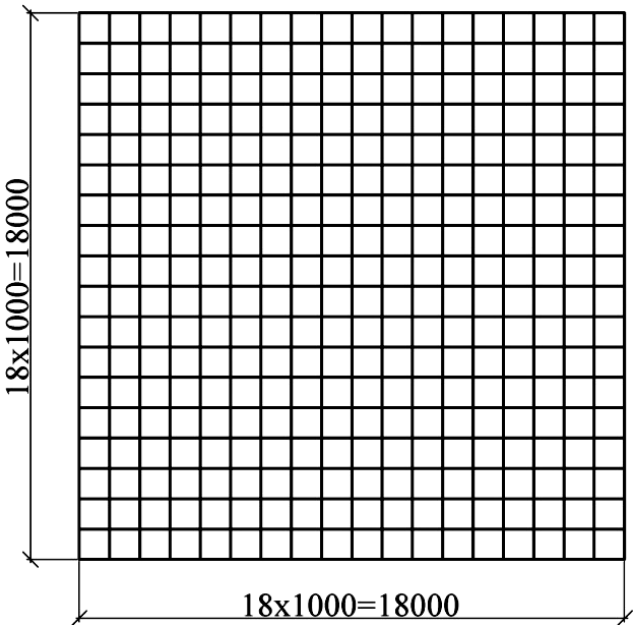


Рисунок 2.6 – Схема системы перекрёстных балок размером в плане 18×18 м с размером ячеек 1,0×1,0 м

Проведены исследования с целью выявления взаимосвязи между максимальным прогибом и собственной частотой основного тона поперечных колебаний системы перекрёстных балок на квадратном плане с различными размерами ячеек при изменении податливости узловых соединений конструкции.

Результаты исследований СПБ размером в плане 18×18м с размером ячеек 1,0×1,0 м представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты численных исследований системы перекрёстных балок с размером ячеек 1,0×1,0 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	712,87	4,677685	1,5900	1,582	0,51
2	0,001	74,4	14,47935	1,5900		0,51
3	0,005	17,65	29,73012	1,5902		0,52
4	0,008	12,33	35,5723	1,5904		0,53
5	0,01	10,55	38,44534	1,5895		0,48
6	0,03	5,83	51,75286	1,5917		0,61
7	0,05	4,88	56,5484	1,5907		0,55
8	0,1	4,17	61,17122	1,5906		0,54
9	0,2	3,82	63,95261	1,5926		0,67
10	0,3	3,7	64,96758	1,5919		0,62
11	0,5	3,6	65,81523	1,5896		0,48

Продолжение таблицы 2.3

12	0,6	3,58	66,03246	1,5912		0,58
13	0,8	3,55	66,30693	1,5910		0,57
14	1	3,53	66,47325	1,5900		0,50

Результаты исследований СПБ с другими размерами ячеек приведены в приложении А.

По данным таблицы 2.3 и данным приложения А построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и коэффициента К (рисунки 2.7…2.8) в зависимости от размеров ячейки и величины податливости связей.

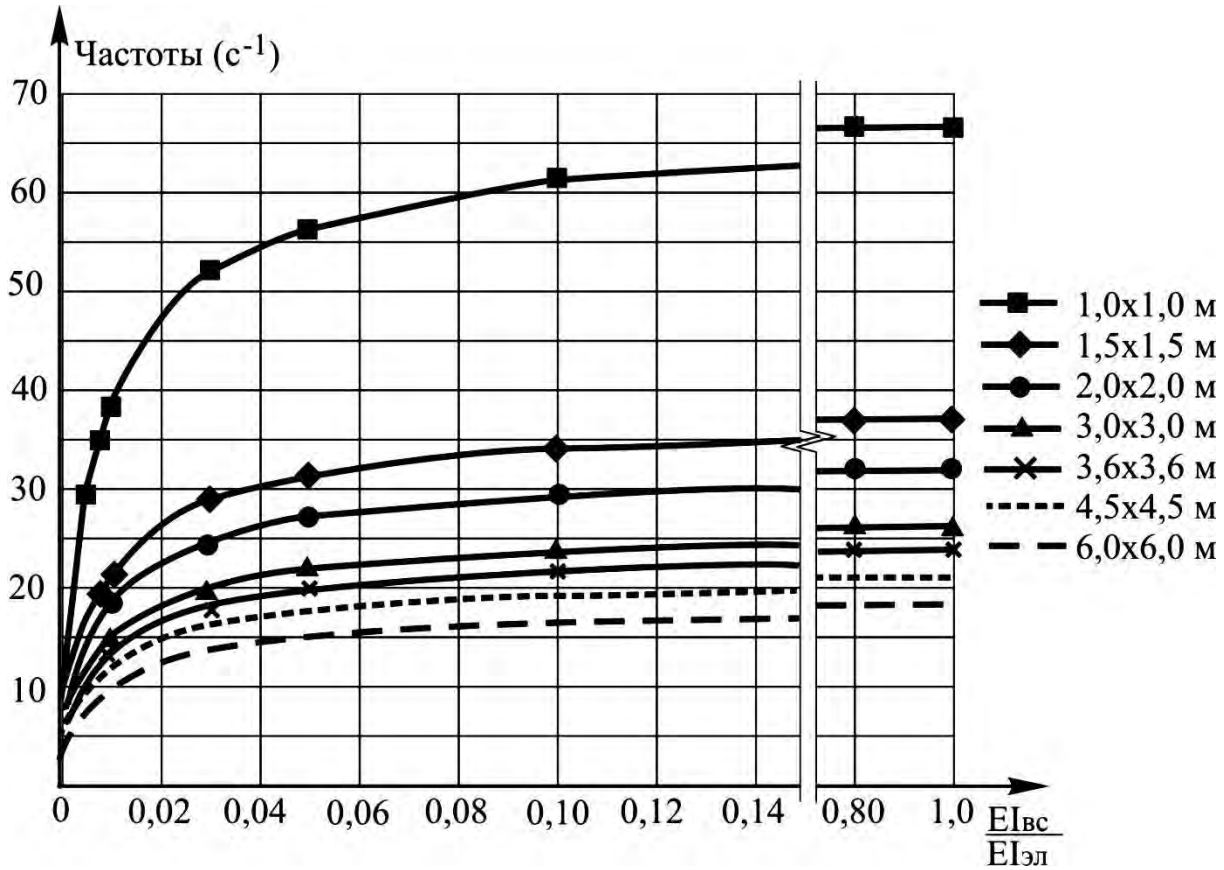


Рисунок 2.7 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек

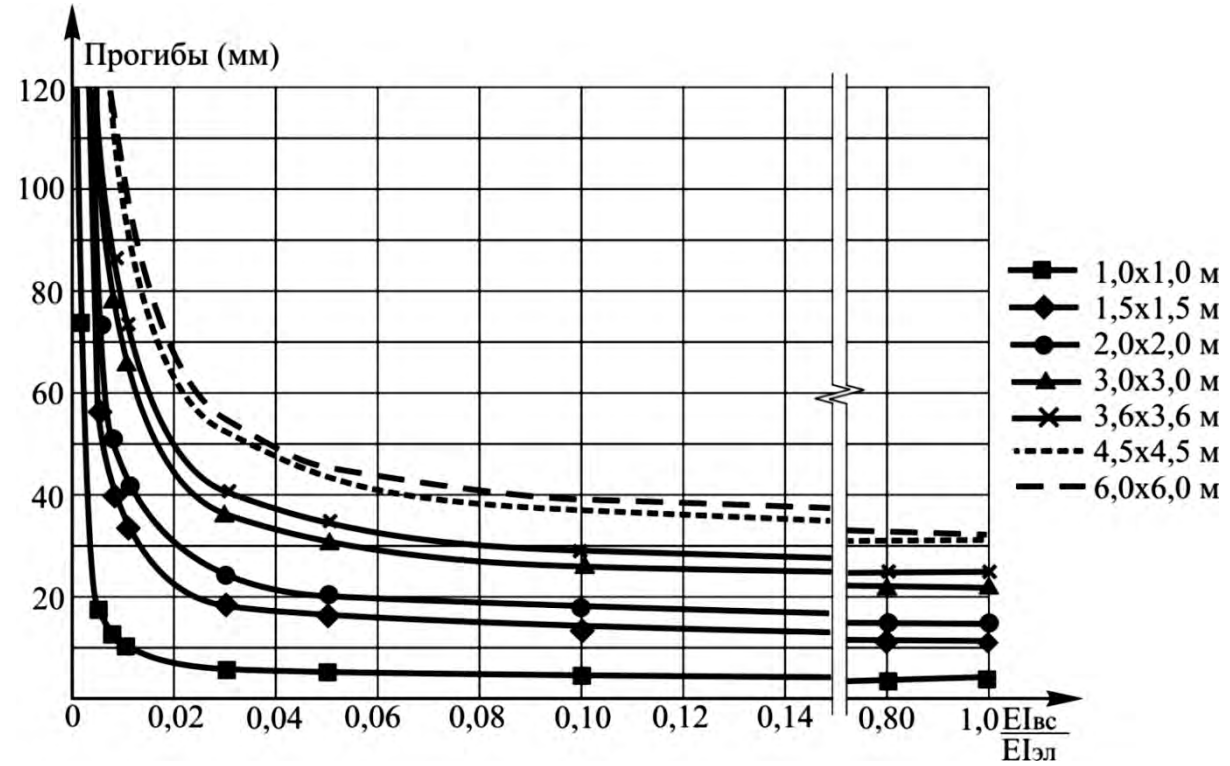


Рисунок 2.8– Изменение прогибов в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек

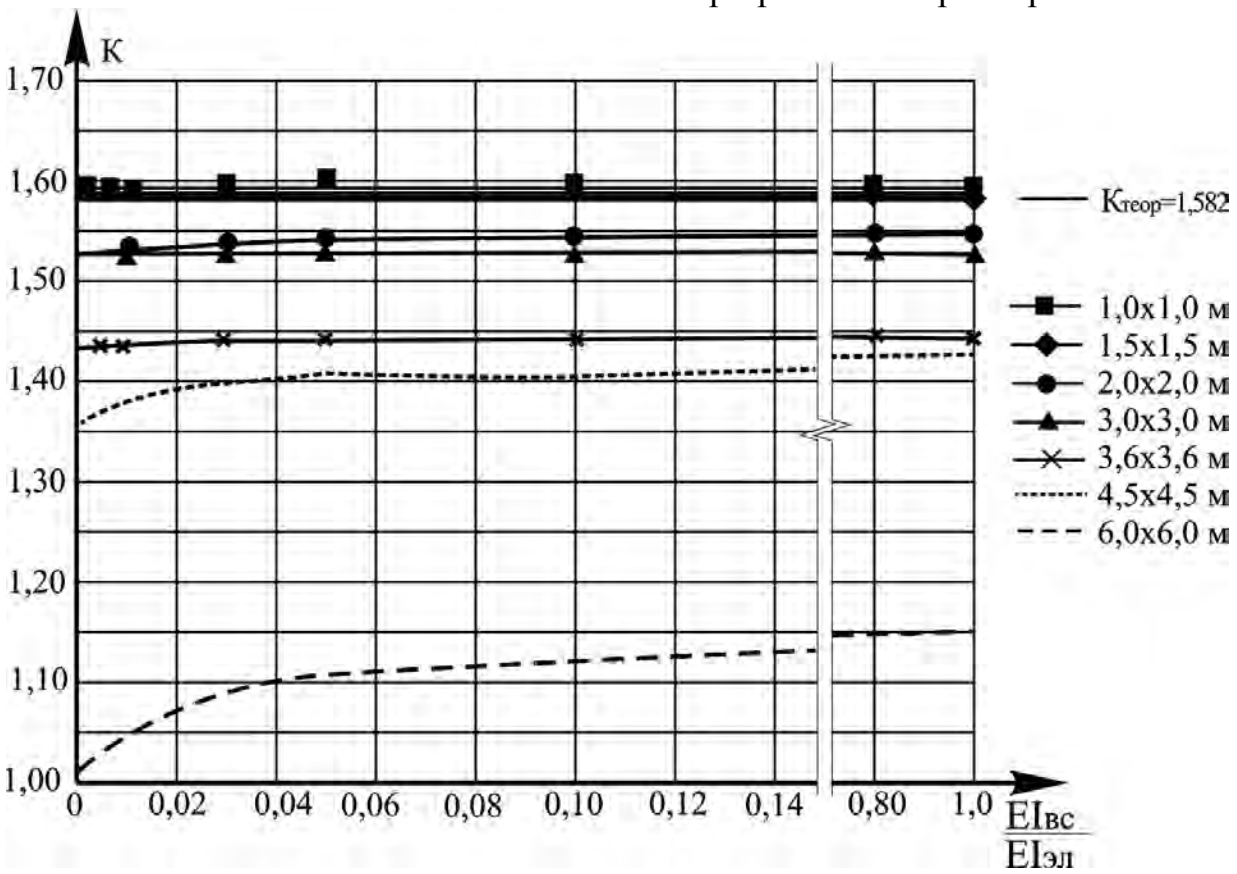


Рисунок 2.9 – Изменение коэффициента К в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек

Анализ данных показывает, что с уменьшением размера ячейки система перекрёстных балок стремиться к пластинам, и, как следствие, коэффициент К стремится к значению $К_{теор.}$ для квадратных пластин. При минимальном размере ячейки изменение соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента незначительно влияет на изменение коэффициента К. Зависимость коэффициента К от изменения соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента увеличивается при увеличение размера ячейки. Максимальное отклонение коэффициента К от теоретического при размере ячеек 1,0×1,0 м составило 0,67%, а при размере ячеек 6,0×6,0 м отклонение 36,36%.

2.2.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок в зависимости от схемы опирания

Проведены исследования с целью выявления взаимосвязи максимальных прогибов и частот свободных колебаний системы перекрёстных балок на квадратном плане с различными размерами ячеек с постоянной податливостью узловых соединений конструкции при изменении схемы опирания (количества опор).

По теме данного исследования опубликована статья [78].

Для исследований была принята постоянная податливость узловых соединений; соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента было принято $EI_{вс}/EI_{эл}$=0,03. Результаты исследования СПБ размером в плане 18×18 м с размером ячеек 1,0×1,0 м и различной схемой опирания представлены в таблице 2.4. Принятые в таблицах обозначения: n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов СПБ по одной стороне.

Таблица 2.4 – Результаты численных исследований СПБ размером в плане 18×18 м с размером ячеек 1,0×1,0 м с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$К_{теор}$	Отклонение К от $К_{теор}$ Δ (%)
1	1	5,83	51,75286	1,5917	1,582	-0,61
2	0,53	5,83	51,74638	1,5913		-0,59
3	0,37	5,83	51,72638	1,5901		-0,51

Продолжение таблицы 2.4

4	0,21	5,9	51,41243	1,5897		-0,49
5	0,16	6,28	49,89263	1,5935		-0,73
6	0,11	22,85	21,80676	1,1076		29,98

Результаты исследований СПБ с другими размерами ячеек представлены в приложении Б.

По данным таблицы 2.4 и данным приложения Б построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и коэффициента $К_{расч.}$ в зависимости от количества опор на контуре (рисунки 2.10…2.12).

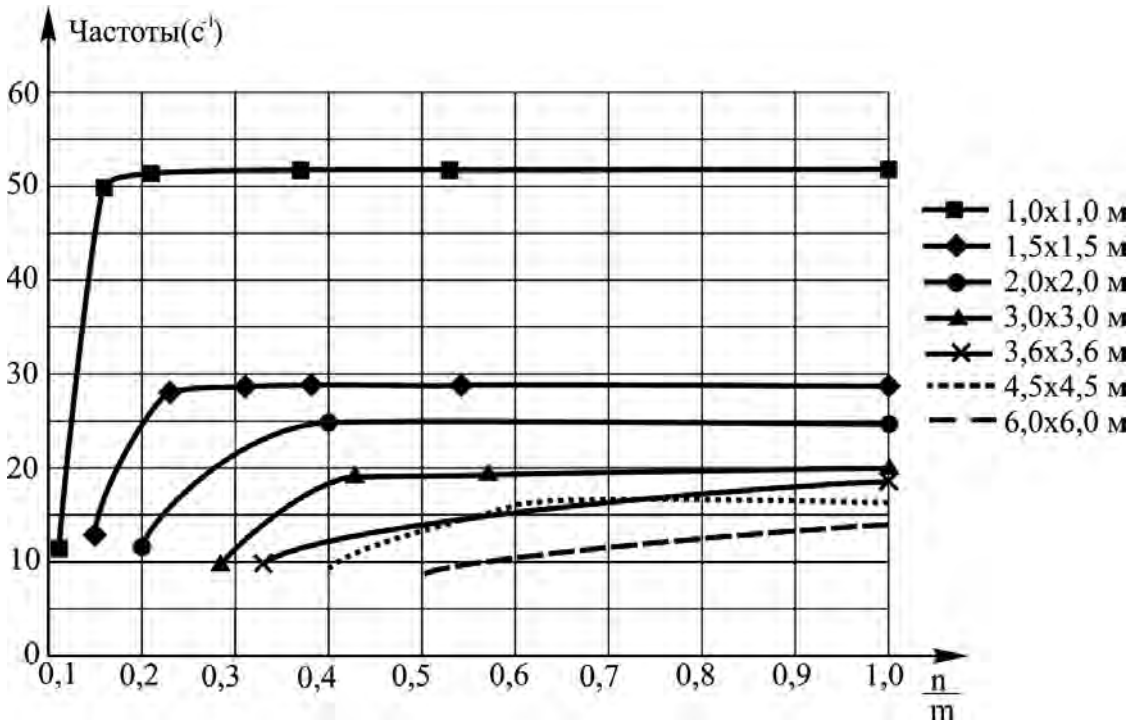


Рисунок 2.10– Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

Анализ результатов исследований частот собственных колебаний и прогибов показывает, что резкое изменение этих параметров происходит в каждом случае при разном соотношении параметра n/m. Это вызвано тем, что с увеличением размера ячейки количество контурных узлов изменяется от 19 (ячейка 1×1 м) до 4 (ячейка 6×6 м). Резкий скачок значений прогибов и частот колебаний происходит в тех случаях, когда опоры остаются только по углам конструкции (2 опоры по одной стороне). В случае, когда по одной стороне находится 3 и более опор, в системах перекрёстных балок динамиче-

ские и жесткостные параметры практически не изменяются по сравнению с опиранием по всем контурным узлам.

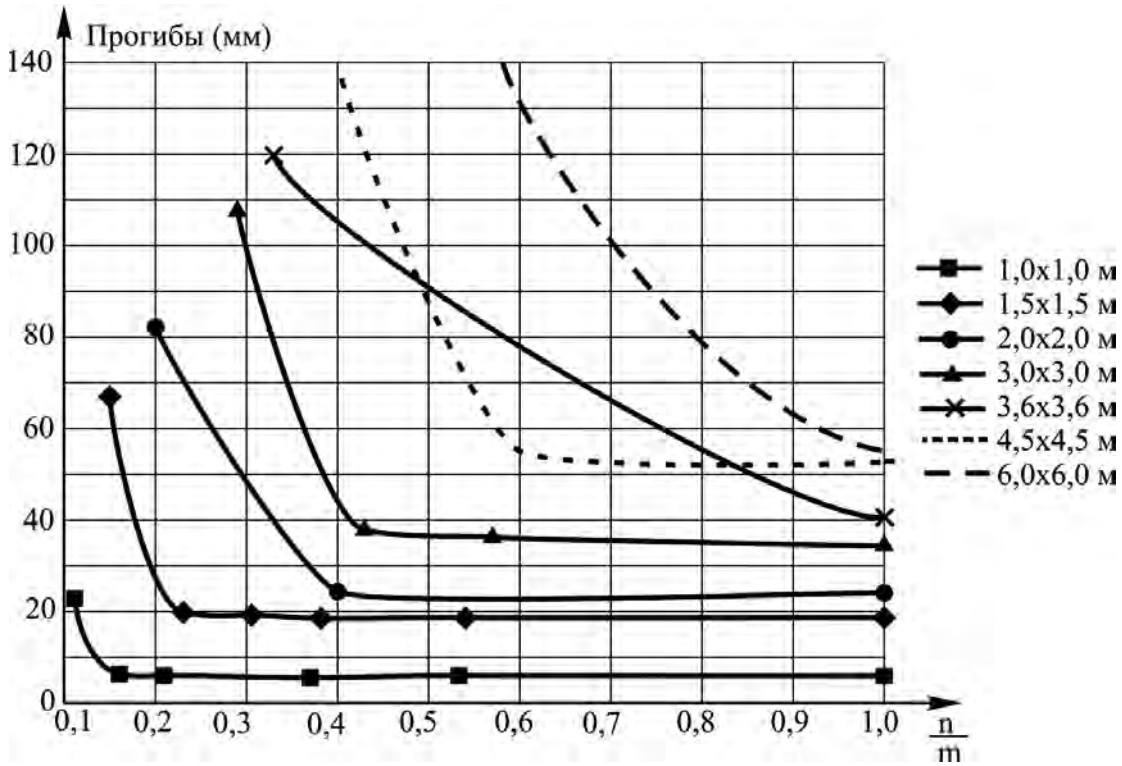


Рисунок 2.11 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

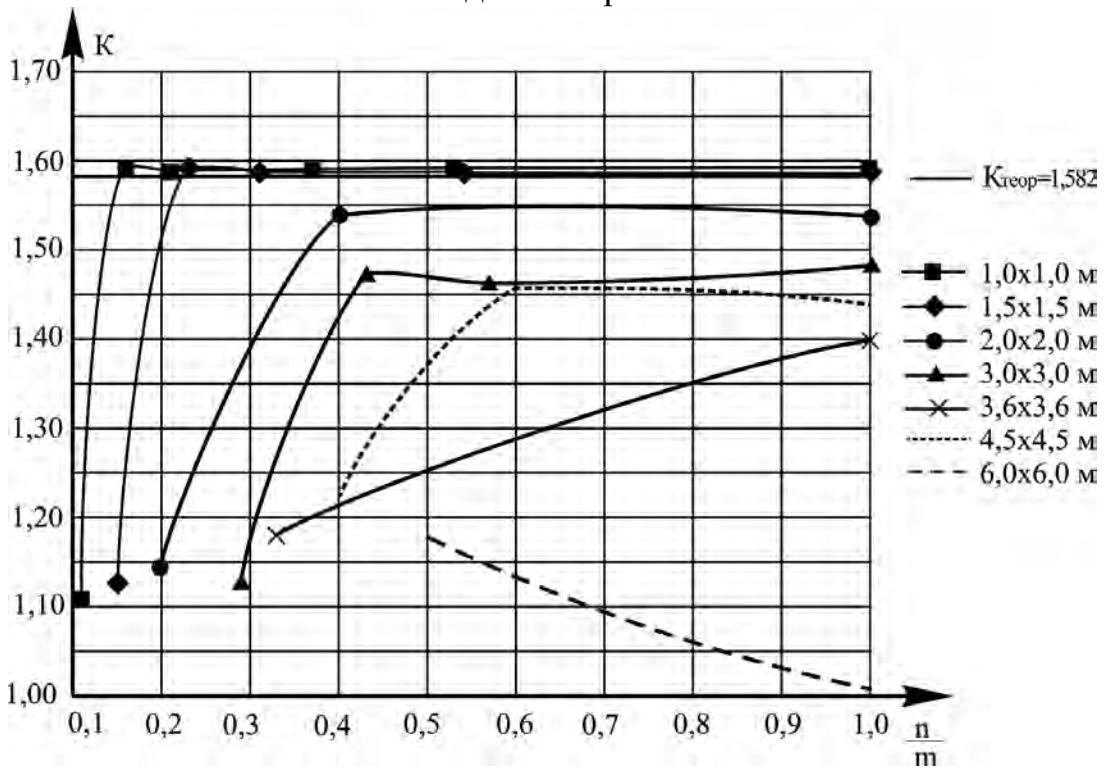


Рисунок 2.12 – Изменение коэффициента К в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

Практически аналогично прогибам и частотам изменяется коэффициент К; наиболее интенсивное его изменение также наблюдается в том случае, когда система опирается по углам.

В результате численных исследований можно сделать вывод, что изменение соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по стороне СПБ, существенно не влияет на динамически и жесткостные параметры, а также на коэффициент К., если количество опор по одной стороне конструкции не менее трёх. При опирании системы только по углам коэффициент К существенно отличается (до 30%) от теоретического значения независимо от размеров ячейки.

2.2.3 Исследования систем перекрёстных балок с покрытием по верхнему поясу в зависимости от жёсткости узловых связей СПБ и размера ячеек

Проведены исследования системы перекрёстных балок на квадратном плане с целью выявления взаимосвязи прогибов и частот свободных колебаний конструкции при изменении размеров ячеек и изменяемой податливостью узловых связей при установке по верхнему поясу элементов покрытия, которые включаются в работу конструкции.

По теме данного исследования опубликована статья [84].

В качестве расчётной была принята конструкция системы перекрёстных балок, аналогичная приведённой в разделе 2.2, включая интенсивность статической нагрузки и схему приложения сосредоточенных масс для динамического расчёта.

Нейтральная ось в элементах системы проходит по центру сечения балок ($b \times h = 160 \times 1221$ мм), элементы покрытия в свою очередь опираются на систему сверху. Таким образом, расстояние между нейтральной осью сечения и элементами покрытия составляет половину высоты балки ($h/2 = 610{,}5$ мм). Это обстоятельство учитывается при задании расчётной схемы системы в программном комплексе SCAD следующим образом (рисунок 2.13): элементы системы перекрёстных балок были разбиты на конечные элементы длиной по 0,5м. Эксцентриситет между нейтральной осью элементов СПБ и срединной поверхностью пластинчатых конечных элементов покрытия моде-

лировался вертикальными стрежнями высотой h/2 = 610,5 мм. На первом этапе считаем, что податливость связей, крепящих элементы покрытия к СПБ, отсутствует, тогда вертикальные элементы моделируем стержневыми конечными элементами очень большой жёсткости ($EI_x = 10^{10}$ Кн·м^2; $EI_y = 10^{10}$ Кн·м^2; $GI_{кр} = 10^{10}$ Кн·м^2; EA = 1,9536·10^6 Кн. Элементы покрытия размером на ячейку моделировались изотропными пластинами с разбивкой на конечные элементы размером 500 × 500 мм. Цилиндрическая жёсткость пластин на первом этапе исследований принята постоянной D = 20 Кн·м.

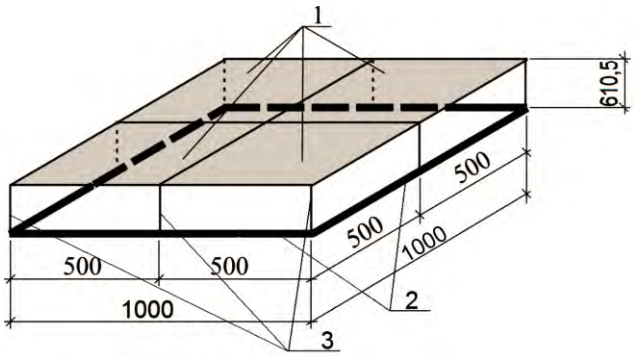


Рисунок 2.13 – Фрагмент расчётного элемента для системы с размером ячеек 1×1м: 1 – пластина размером на ячейку 2 – конечный элемент системы перекрёстных балок; 3 – вертикальные конечные элементы

На первом этапе исследований предполагается, что элементы покрытия соединяются с элементами СПБ неподатливо. Результаты исследований конструкции размером в плане 18×18 м при включении в работу элементов покрытия с размером ячеек 1,0×1,0 м и различной податливостью узловых соединений СПБ представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1×1 м с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение K от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4,57	58,21037	1,5785	1,582	0,22
2	0,001	4,31	59,99794	1,5815		0,03
3	0,005	3,62	65,53026	1,5846		-0,17
4	0,008	3,34	68,33609	1,5899		-0,5
5	0,01	3,2	69,8332	1,5908		-0,55
6	0,03	2,59	77,63958	1,5915		-0,6
7	0,05	2,4	80,75600	1,5955		-0,85
8	0,1	2,22	83,88862	1,5925		-0,67
9	0,2	2,12	85,82891	1,5920		-0,63

Продолжение таблицы 2.5

10	0,3	2,09	86,54671	1,5958		-0,87
11	0,5	2,06	87,15002	1,5949		-0,82
12	0,6	2,05	87,30527	1,5928		-0,68
13	0,8	2,04	87,50166	1,5922		-0,64
14	1	2,04	87,62090	1,5965		-0,92

Результаты исследований СПБ при других размерах ячеек представлены в приложении В.

По данным таблицы 2.5 и данным приложения В построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и коэффициента К (рисунки 2.14…2.16) в зависимости от размеров ячейки и величины податливости узловых связей СПБ.

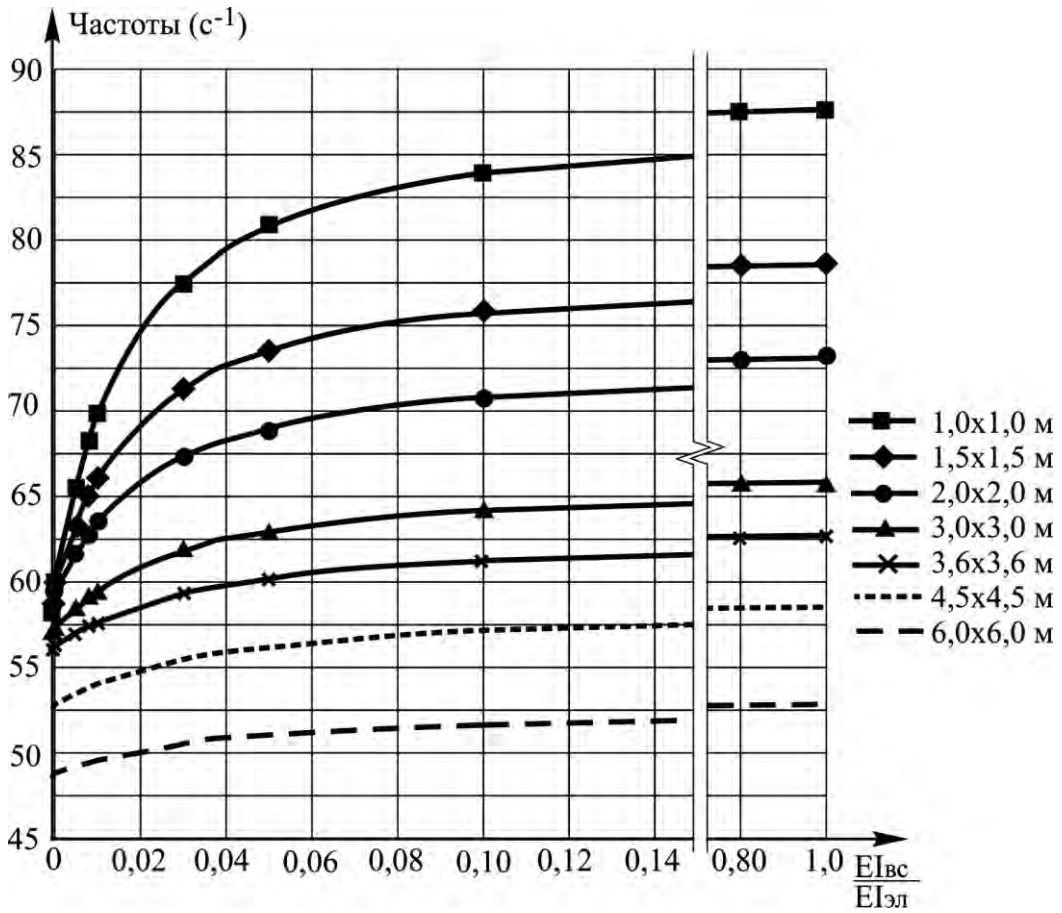


Рисунок 2.14 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек с покрытием сверху

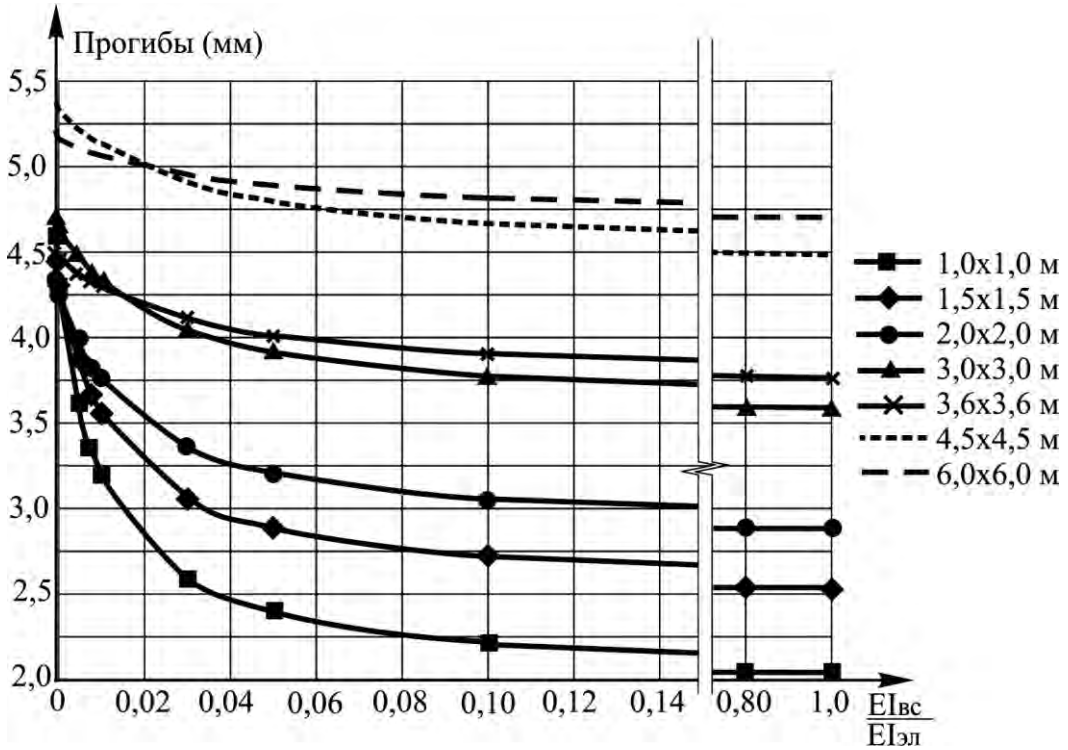


Рисунок 2.15 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек с покрытием сверху

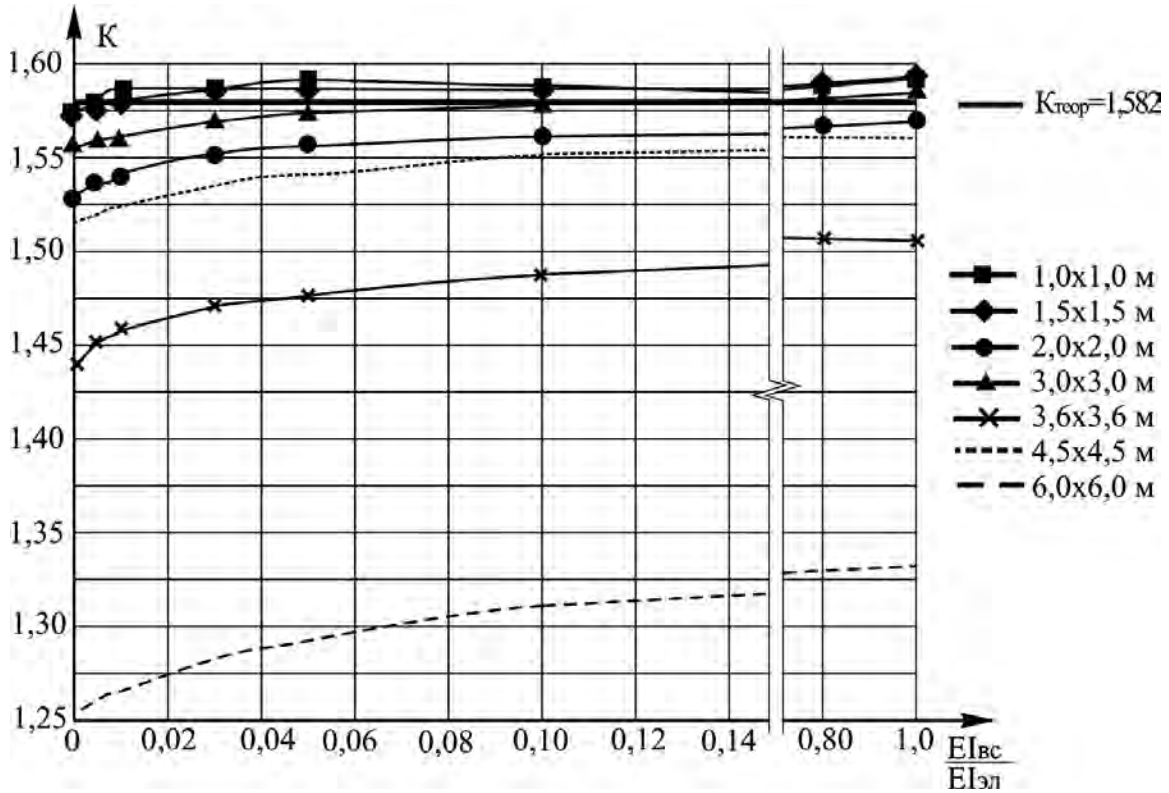


Рисунок 2.16 – Изменение коэффициента К в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек с покрытием сверху

Анализ результатов исследований частот свободных колебаний и прогибов показывает, что при максимальном размере ячейки прогибы и частоты колебаний изменяются в очень небольшом диапазоне при изменении соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента; с уменьшением размера ячейки разность значений исследуемых параметров при минимальном и максимальном соотношении жёсткости вставки к жёсткости элемента увеличивается.

Графики изменения частот собственных колебаний и прогибов (рисунки 2.14 и 2.15) показывают, что их наиболее интенсивное изменение происходит в диапазоне соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{эл}$ от 0 до 0,14. При больших соотношениях жёсткостей вставки и элемента влияние податливости узловых соединений практически не сказывается на динамических и жёсткостных параметрах системы перекрёстных балок.

Анализ данных показывает, что с уменьшением размера ячейки система перекрёстных балок приближается в своей работе к пластинам, и, как следствие, коэффициент К стремиться к значению $К_{теор.}$ для квадратных пластин. При минимальном размере ячейки коэффициент К практически совпадает с теоретическим значением, с увеличением размера ячейки отклонение расчётного коэффициента К от теоретического возрастает. Максимальное отклонение коэффициента К от теоретического при размере ячеек 1,0×1,0 м составило -0,92%, 1,5×1,5 м – -0,94%; 2,0×2,0м – 3,19%; 3,0×3,0м – 1,88%; 3,6×3,6м – 8,93%; 4,5×4,5 – 4,14%; 6,0×6,0м – 20,77%.

2.2.4 Результаты исследований систем перекрёстных балок с покрытием по верхнему поясу в зависимости от податливости связей, крепящих элементы покрытия к элементам системы перекрёстных балок

На втором этапе исследований рассматривается влияние податливости крепления элементов покрытия к СПБ на динамические и статические характеристики конструкции. Жёсткость вертикальных элементов изменялась от 0 (в практических расчётах принято $EI_x = 10^{-4}$ Кн·м^2; $EI_y = 10^{-4}$ Кн·м^2; $GI_{кр} = 10^4$ Кн·м^2, EA = $1{,}9536 \cdot 10^6$ Кн) до очень высокой жёсткости, соответствующей неподатливому креплению ($EI_x=10^{10}$ Кн·м^2; $EI_y=10^{10}$ Кн·м^2; $GI_{кр}=10^{10}$

Кн·м^2, ЕА = 1,9536·10^6 Кн). При жёсткости вертикальных элементов, равных 0, покрытие не включается в совместную работу с системой перекрёстных балок, а при очень большой жёсткости вертикальных элементов податливость связей, крепящих элементы покрытия к СПБ, отсутствует. Соотношение жёсткости вставки к жёсткости элемента самой системы перекрёстных балок принято постоянным $EI_{вс}/EI_{эл}$=0,03.

В результате исследований определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок. Результаты исследований конструкции размером в плане 18×18 м с покрытием по верхнему поясу системы с размером ячеек 1,0×1,0 м при изменении податливости крепления пластины к СПБ представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м, с пластиной сверху, при изменении податливости крепления пластины к системе

№ п/п	EI_x; EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	2,59	77,63958	1,5915	1,582	-0,6
2	10^7	2,59	77,63185	1,5911		-0,58
3	10^5	2,64	76,92362	1,5924		-0,66
4	10^4	2,93	72,86723	1,5859		-0,24
5	$6\cdot10^3$	3,08	71,00782	1,5830		-0,07
6	$3\cdot10^3$	3,37	67,92474	1,5850		-0,19
7	10^3	4,00	62,37777	1,5865		-0,29
8	$5\cdot10^2$	4,46	59,10663	1,5883		-0,4
9	10^2	5,35	54,01556	1,5912		-0,58
10	10	6,02	50,97151	1,5943		-0,78
11	10^{-1}	6,23	50,00779	1,5882		-0,39
12	10^{-4}	6,26	49,99478	1,5950		-0,82

Результаты исследований СПБ при других размерах ячеек приведены в приложении Г.

По данным таблицы 2.7 и данных приложения Г построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и коэффициента $K_{расч.}$ (рисунки 2.17…2.19) в зависимости от размеров ячейки и ве-

личины податливости связей, крепящих элементы покрытия к элементам системы перекрёстных балок. По оси абсцисс введена логарифмическая шкала.

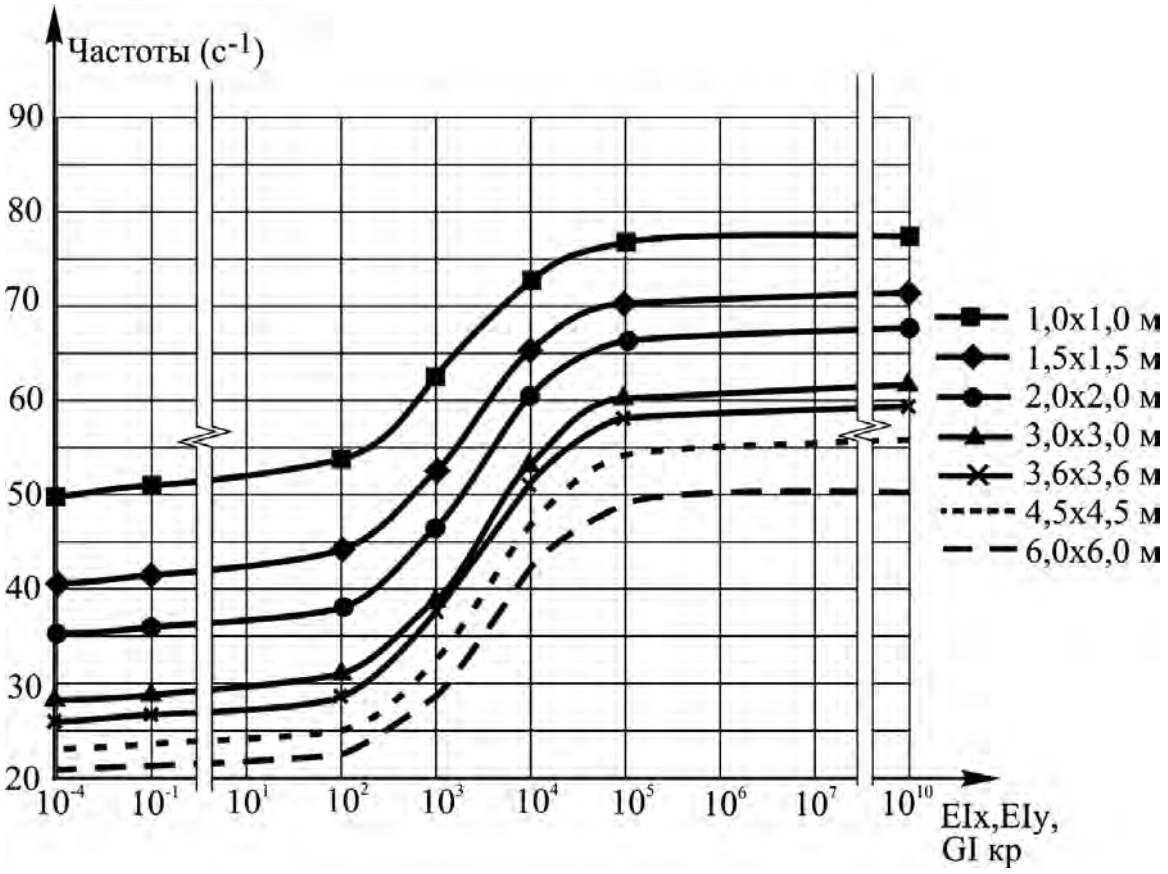


Рисунок 2.17 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от податливости крепления покрытия к системе при различных размерах ячеек с покрытием сверху

Частоты собственных колебаний изменяются достаточно плавно без резких скачков. Наиболее резкие изменения наблюдается в пределах от 1000 до 3000 EI_x; EI_y; $GI_{кр.}$

Анализ результатов исследований изменений частот собственных колебаний (рисунок 2.17) показывает, что с уменьшением жёсткости вертикальных элементов частоты уменьшаются и при наименьшей жёсткости (покрытие выключается из совместной работы с СПБ) частоты совпадают со значениями частот системы перекрёстных балок без включения в работу покрытия.

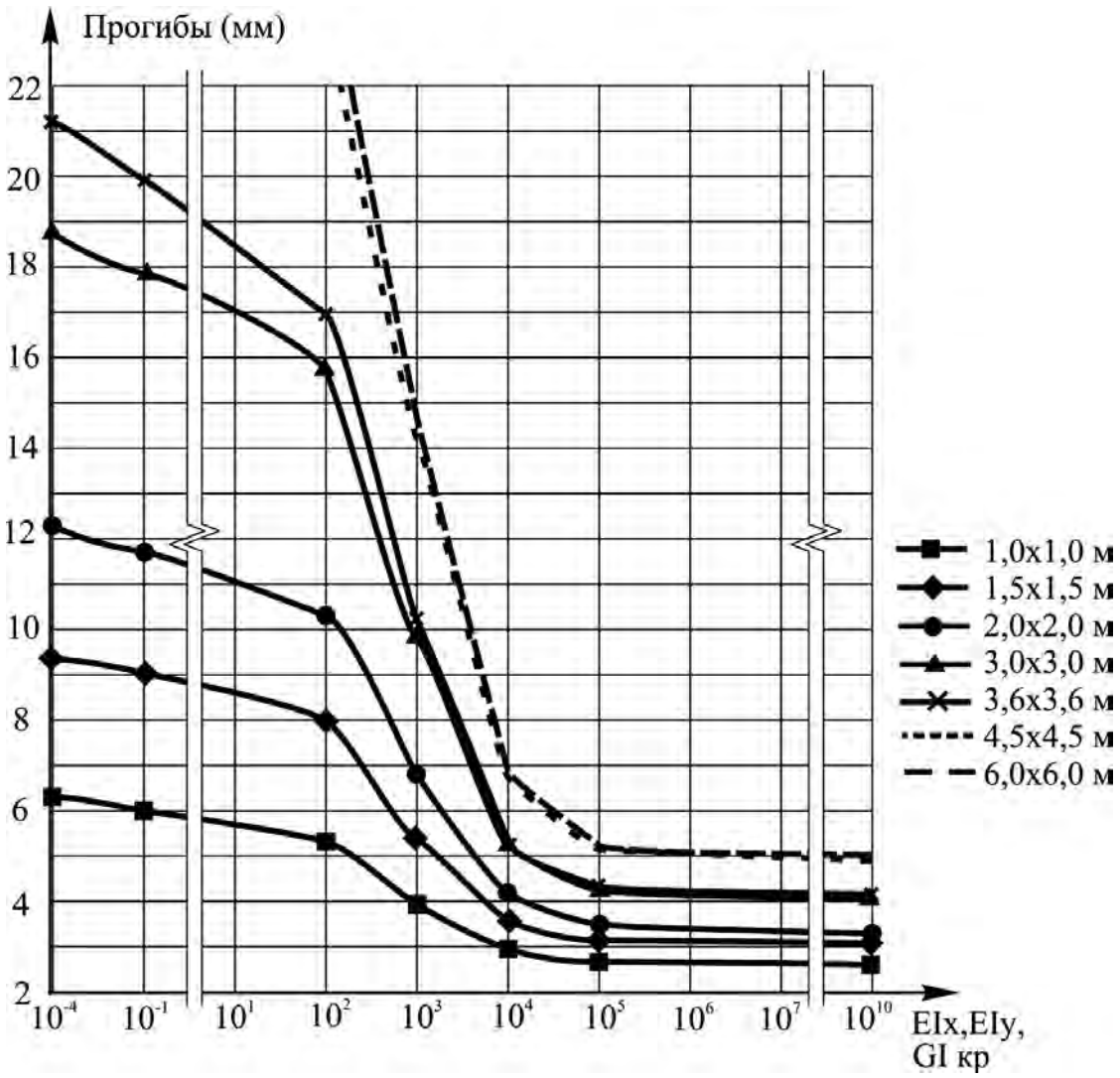


Рисунок 2.18 – Изменение прогибов в зависимости от податливости крепления покрытия к системе при различных размерах ячеек с покрытием сверху

Наиболее интенсивное изменение прогибов конструкции наблюдается в пределах от 0 до 3000 EI_x, EI_y, $GI_{кр}$, EA (кН·м^2, кН), при этом достаточно медленно снижаются при дальнейшем увеличении жёсткости вертикальных элементов.

Так же, как для частот колебаний, с уменьшением жёсткости вертикальных элементов при наименьшей жёсткости (выключение из работы элементов покрытия) прогибы (рисунок 2.18) совпадают со значениями прогибов для системы перекрёстных балок без покрытия. Это объясняется тем, что в случае шарнирного крепления покрытия к системе перекрёстных балок, покрытие практически не включается в работу и не влияет на изменение статических и динамических параметров.

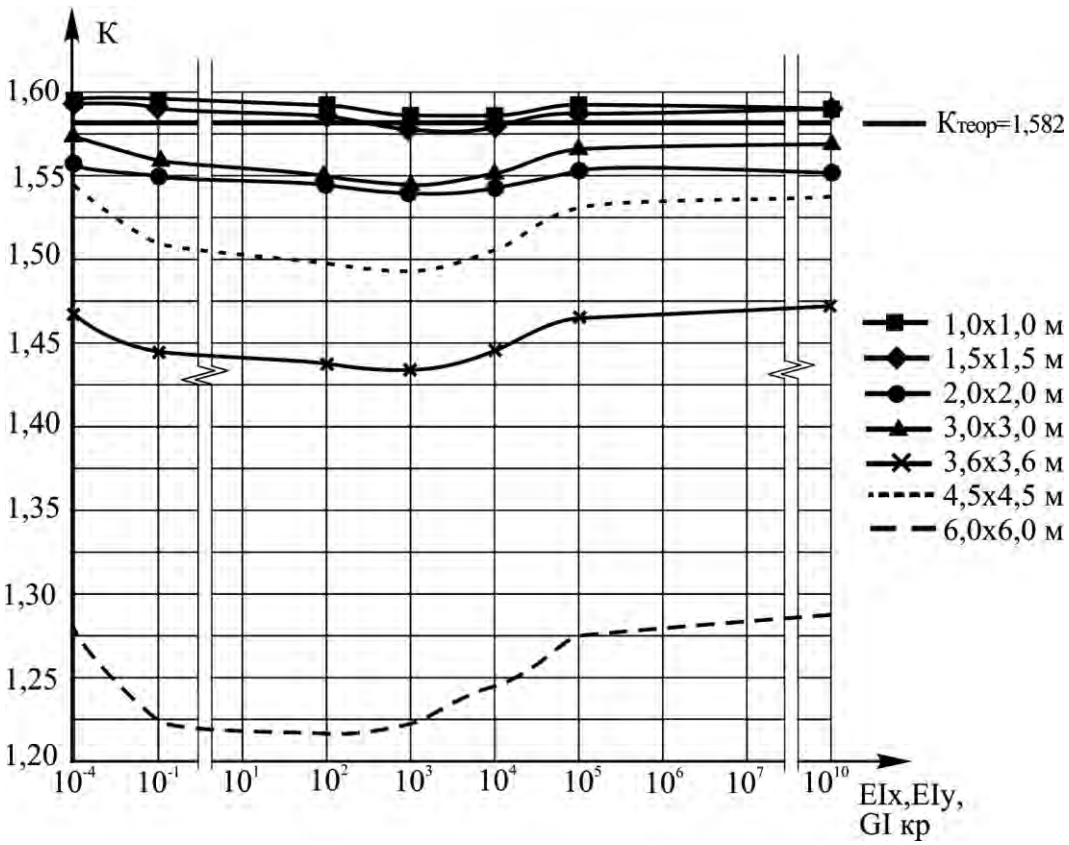


Рисунок 2.19 – Изменение коэффициента К в зависимости от податливости крепления покрытия к системе при различных размерах ячеек с покрытием сверху

При минимальном размере ячейки коэффициент К практически совпадает с теоретическим значением, с увеличением размера ячейки отклонение расчётного коэффициента К от теоретического возрастает. Для систем с размерами ячеек 1,0×1,0 м максимальное отклонение коэффициента К от теоретического значения составило -0,78%, минимальное – -0,19%; для ячеек 1,5×1,5 м max – -0,72% min – 0,03%; для ячеек 2,0×2,0 м max – 2,73% min – 1,59%; для ячеек 3,0×3,0 м max – 2,31% min – 0,41%; для ячеек 3,6×3,6 м max – 9,36% min – 6,89%; для ячеек 4,5×4,5 м max – 5,59% min – 2,29%; для ячеек 6,0×6,0 м max – 23,09% min – 18,69%.

2.2.5 Результаты исследований систем перекрёстных балок с покрытием по верхнему поясу в зависимости от жёсткости покрытия и размера ячеек

В данном разделе исследуется зависимость влияния жёсткости элементов покрытия на статические и динамические параметры системы перекрёст-

ных балок. По теме данного исследования опубликована статья [43].

В качестве изменяемого параметра принята цилиндрическая жёсткость пластинки D, моделирующая элементы покрытия, при этом жёсткость изменялась от 0,3125 Кн·м до 540 Кн·м. Соотношение жёсткости вставки к жёсткости элемента в СПБ принято постоянным $EI_{вс}/EI_{Эл}$ = 0,03. Принято, что элементы покрытия жёстко связаны с системой перекрёстных балок ($EI_x=10^{10}$ Кн·м^2; $EI_y=10^{10}$ Кн·м^2; $GI_{кр}=10^{10}$ Кн·м^2, EA = $1{,}9536\cdot10^6$ Кн).

В результате исследований определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок. Результаты исследований конструкции размером в плане 18×18 м с покрытием по верхнему поясу системы с размером ячеек 1,0×1,0 м при изменении жёсткости покрытия представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с покрытием по верху при изменении жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение K от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	4,57	58,49893	1,5942	1,582	-0,77
2	2,5000	3,62	65,70061	1,5929		-0,69
3	8,4375	3,01	72,00416	1,5908		-0,56
4	20,0000	2,59	77,63958	1,5915		-0,6
5	39,0625	2,28	82,75213	1,5916		-0,6
6	67,5000	2,03	87,44076	1,5822		-0,01
7	107,1875	1,85	91,77643	1,5884		-0,41
8	160,0000	1,7	95,81244	1,5908		-0,56
9	227,8125	1,58	99,58868	1,5974		-0,97
10	312,5000	1,47	103,1401	1,5941		-0,76
11	415,9375	1,38	106,4922	1,5953		-0,84
12	540,0000	1,3	109,6667	1,5938		-0,74

Результаты исследований СПБ при других размерах ячеек приведены в приложении Д.

По данным таблиц 2.7 и данным приложения Д построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и коэффициента K (рисунки 2.20…2.22) в зависимости от размеров ячейки и цилиндрической жёсткости покрытия.

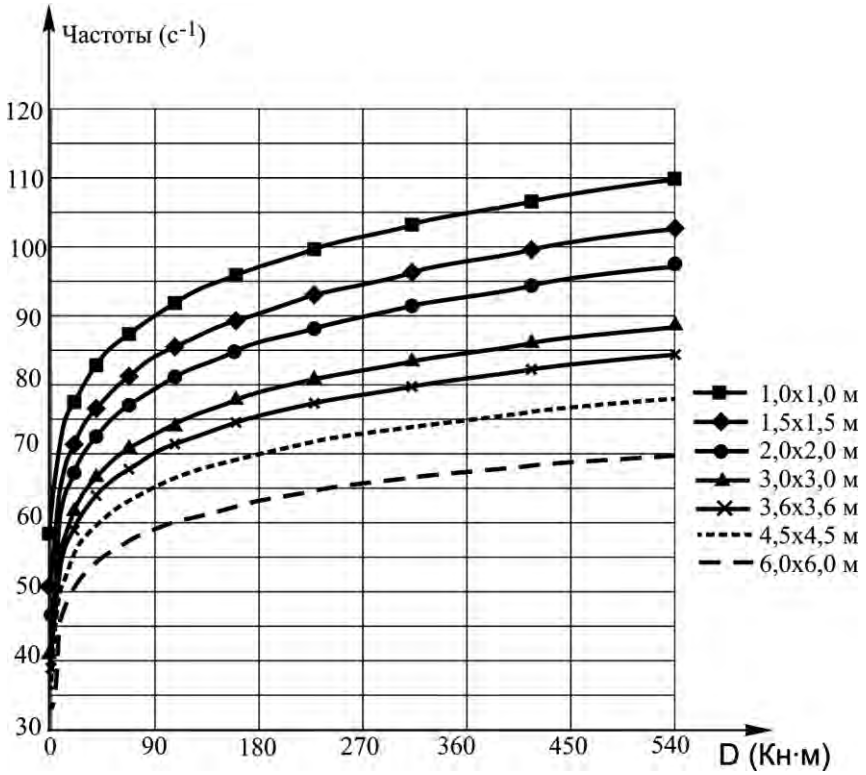


Рисунок 2.20 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от цилиндрической жёсткости покрытия при различных размерах ячеек

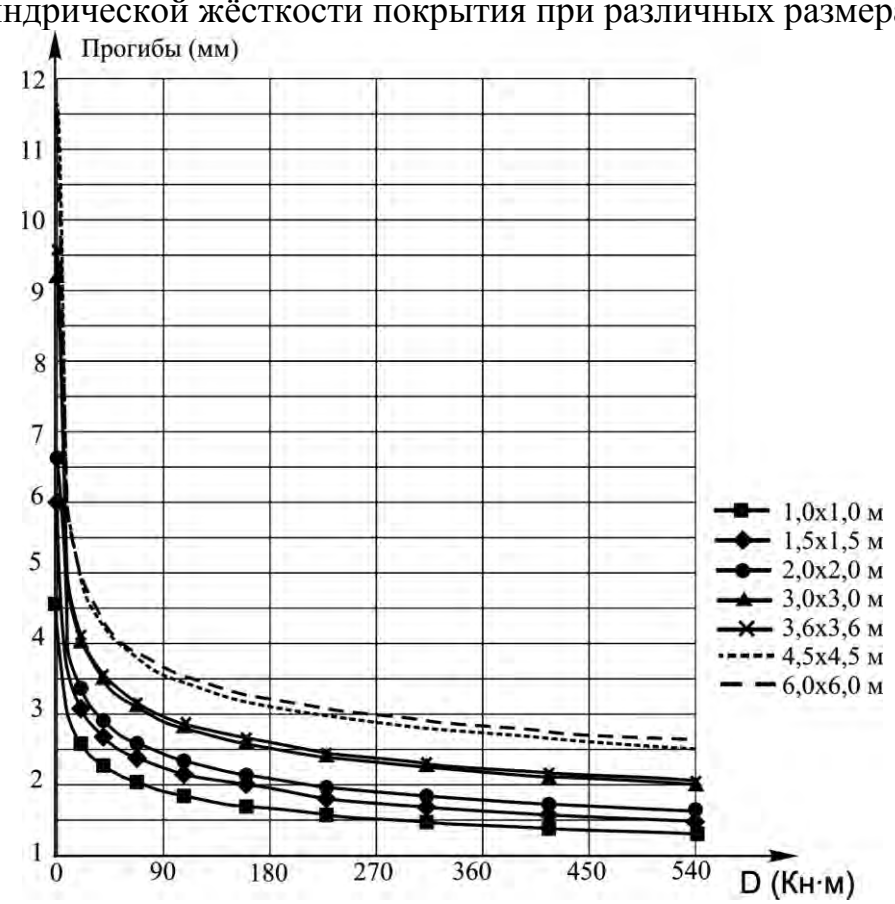


Рисунок 2.21 – Изменение прогибов в зависимости от цилиндрической жёсткости покрытия при различных размерах ячеек

Анализ результатов исследований, представленных на рисунках 2.20 и 2.21 показывает, что с увеличением цилиндрической жёсткости пластины происходит планомерное увеличение частот свободных колебаний. Прогибы в свою очередь с увеличением цилиндрической жёсткости уменьшаются.

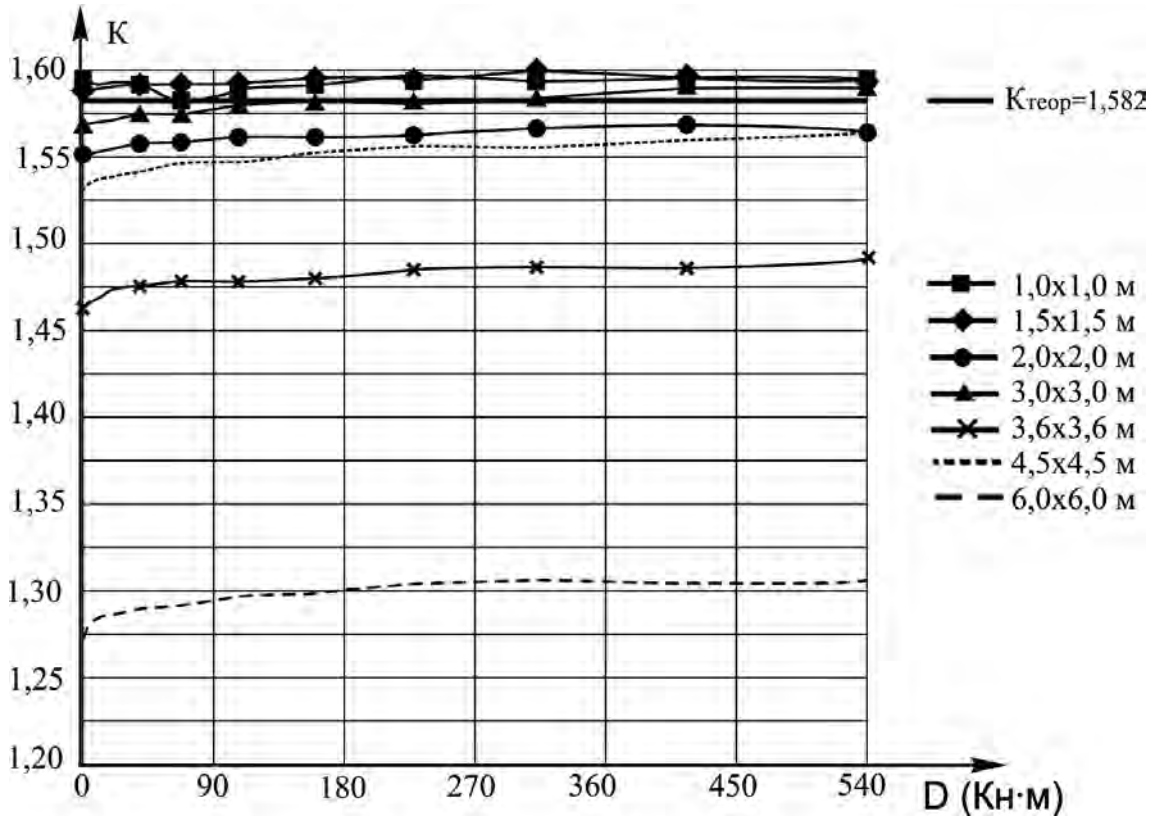


Рисунок 2.22 – Изменение коэффициента К в зависимости от цилиндрической жёсткости покрытия при различных размерах ячеек

Анализ данных показывает, что с увеличением цилиндрической жёсткости покрытия, система перекрёстных балок по своей работе приближается к пластинам, и, как следствие, коэффициент К стремиться к значению $К_{теор.}$ для квадратных пластин. Также выявлено, что при минимальном размере ячейки коэффициент К практически совпадает с теоретическим значением; с увеличением размера ячейки отклонение коэффициента К от теоретического увеличивается. Минимальное отклонение коэффициент $К_{расч.}$ от $К_{теор.}$ для систем с размером ячеек 1,0×1,0м – -0,01%; 1,5×1,5 м – -0,41%; 2,0×2,0м – 0,88%; 3,0×3,0м – -0,04%; 3,6×3,6м – 5,71%; 4,5×4,5 – 1,11%; 6,0×6,0м – 17,42%.

2.2.6 Сопоставление результатов исследований систем перекрёстных балок без покрытия и с покрытием по верхнему поясу

Для сравнения приняты СПБ с размерами ячеек от 1,0×1,0 м до 6,0×6,0 м. Сравнивались следующие параметры: максимальный прогиб, основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок, коэффициент $К_{расч}$.

В таблицах 2.8…2.10 приведены исследованные параметры при соотношении жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{Эл}$ = 0,03. Принято, что элементы покрытия жёстко связаны с системой перекрёстных балок ($EI_x=10^{10}$ Кн·м^2; $EI_y=10^{10}$ Кн·м^2; $GI_{кр}=10^{10}$ Кн·м^2, EA = $1{,}9536\cdot10^6$ Кн). Цилиндрическая жёсткость покрытия принята постоянной D=20,0 Кн·м.

Таблица 2.8 – Сопоставление полученных прогибов СПБ с покрытием по верхнему поясу и без покрытия, для различных размеров ячеек

Размер ячейки (м)	СПБ без элементов покрытия	СПБ с элементами покрытия	Разница между прогибами
	W_0, (мм)	W_0, (мм)	Δ (%)
1,0×1,0	5,83	2,59	55,57
1,5×1,5	18,64	3,07	83,53
2,0×2,0	24,22	3,36	86,13
3,0×3,0	36,51	4,04	88,93
3,6×3,6	40,43	4,11	89,83
4,5×4,5	52,83	4,91	90,71
6,0×6,0	55,05	4,95	91,01

Таблица 2.9 – Сопоставление полученных частот свободных колебаний СПБ с покрытием по верхнему поясу и без покрытия, для различных размеров ячеек

Размер ячейки (м)	СПБ без элементов покрытия	СПБ с элементами покрытия	Разница между частотами
	ω, (1/с)	ω, (1/с)	Δ (%)
1,0×1,0	51,75286	77,63958	33,34
1,5×1,5	28,89636	71,28362	59,46
2,0×2,0	24,95869	67,30816	62,92
3,0×3,0	20,24703	61,7574	67,22
3,6×3,6	18,42435	59,29457	68,93

Продолжение таблицы 2.9

4,5×4,5	16,34976	55,43626	70,51
6,0×6,0	13,92248	50,49109	72,43

Таблица 2.10 – Сопоставление коэффициента К для СПБ с покрытием по верхнему поясу и без покрытия, для различных размеров ячеек

Размер ячейки (м)	СПБ без элементов покрытия	Отклонение К от $К_{теор}$	СПБ с элементами покрытия	Отклонение К от $К_{теор}$
	$К_{расч.}$	Δ (%)	$К_{расч.}$	Δ (%)
1,0×1,0	1,5917	0,61	1,5915	-0,60
1,5×1,5	1,5866	0,29	1,5902	-0,51
2,0×2,0	1,5380	2,78	1,5517	1,91
3,0×3,0	1,5257	3,56	1,5707	0,71
3,6×3,6	1,3990	11,57	1,4730	6,89
4,5×4,5	1,4396	9,00	1,5382	2,77
6,0×6,0	1,0877	31,24	1,2864	18,69

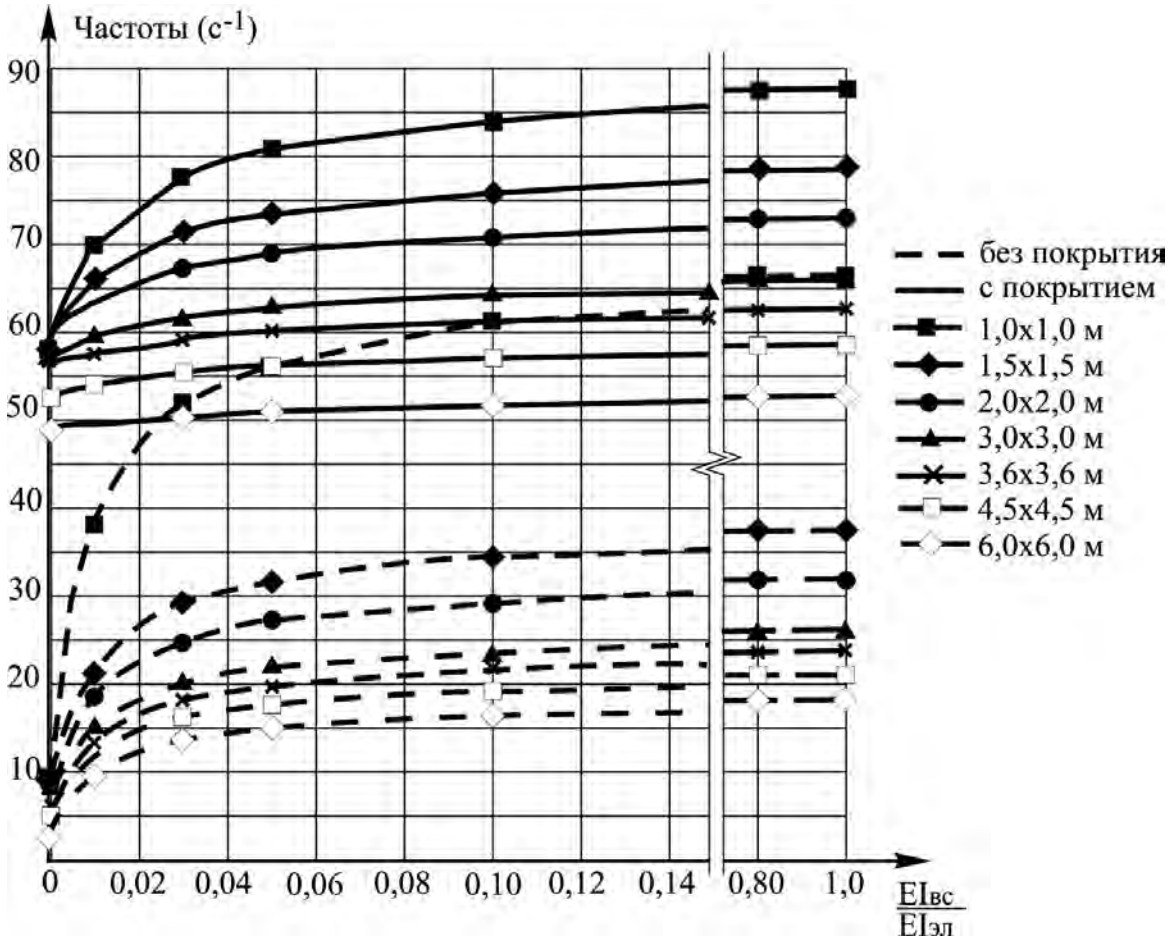


Рисунок 2.23 –Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

При включении в работу элементов покрытия по верхнему поясу системы перекрёстных балок частоты свободных колебаний увеличиваются. Изменение соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента незначительно влияет на изменение частот свободных колебаний при увеличении размеров ячейки.

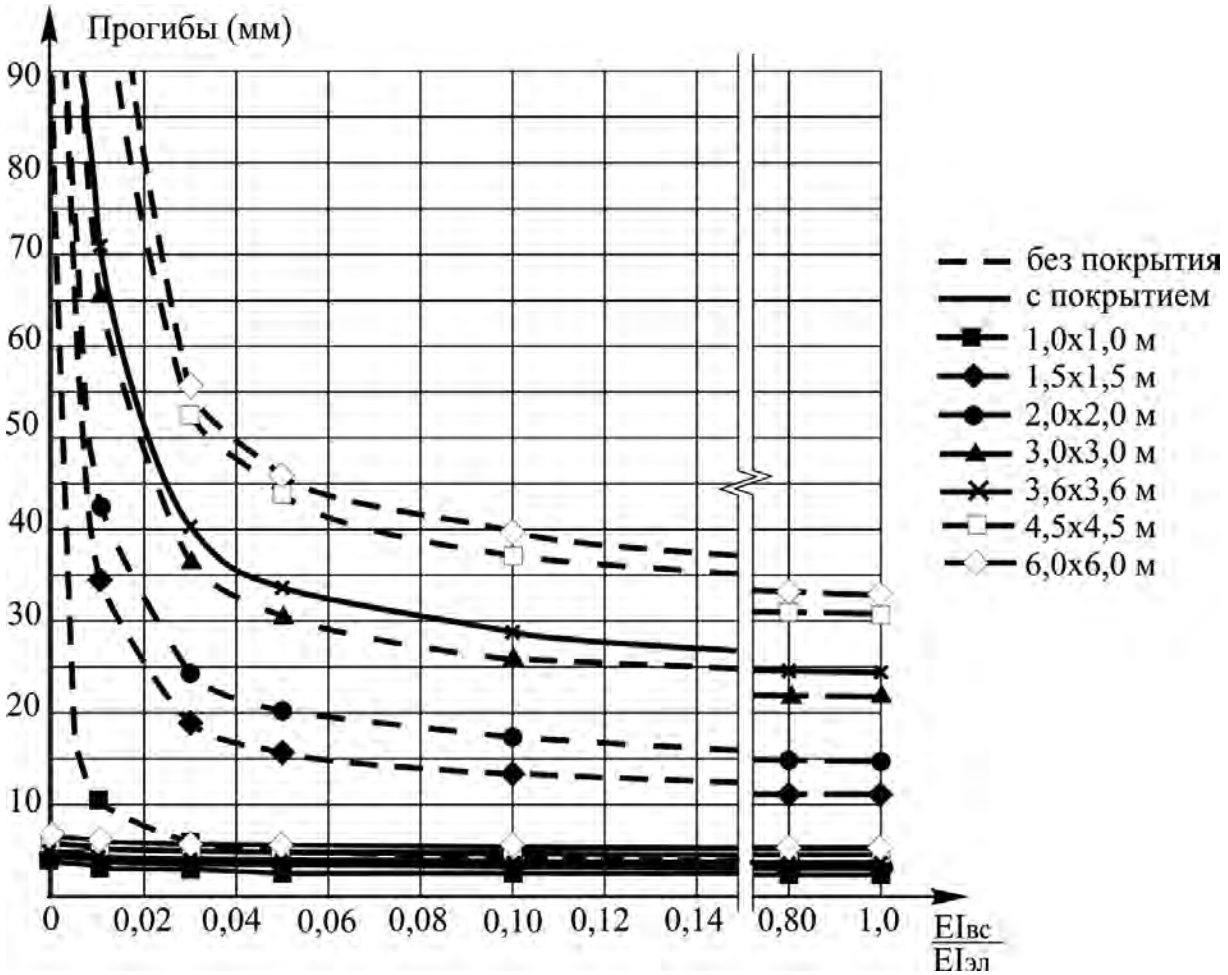


Рисунок 2.24 –Изменение прогибов в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

Прогибы с включением в работу СПБ покрытия значительно уменьшаются. Изменение соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента практически не влияет на изменение прогибов, при СПБ с покрытием.

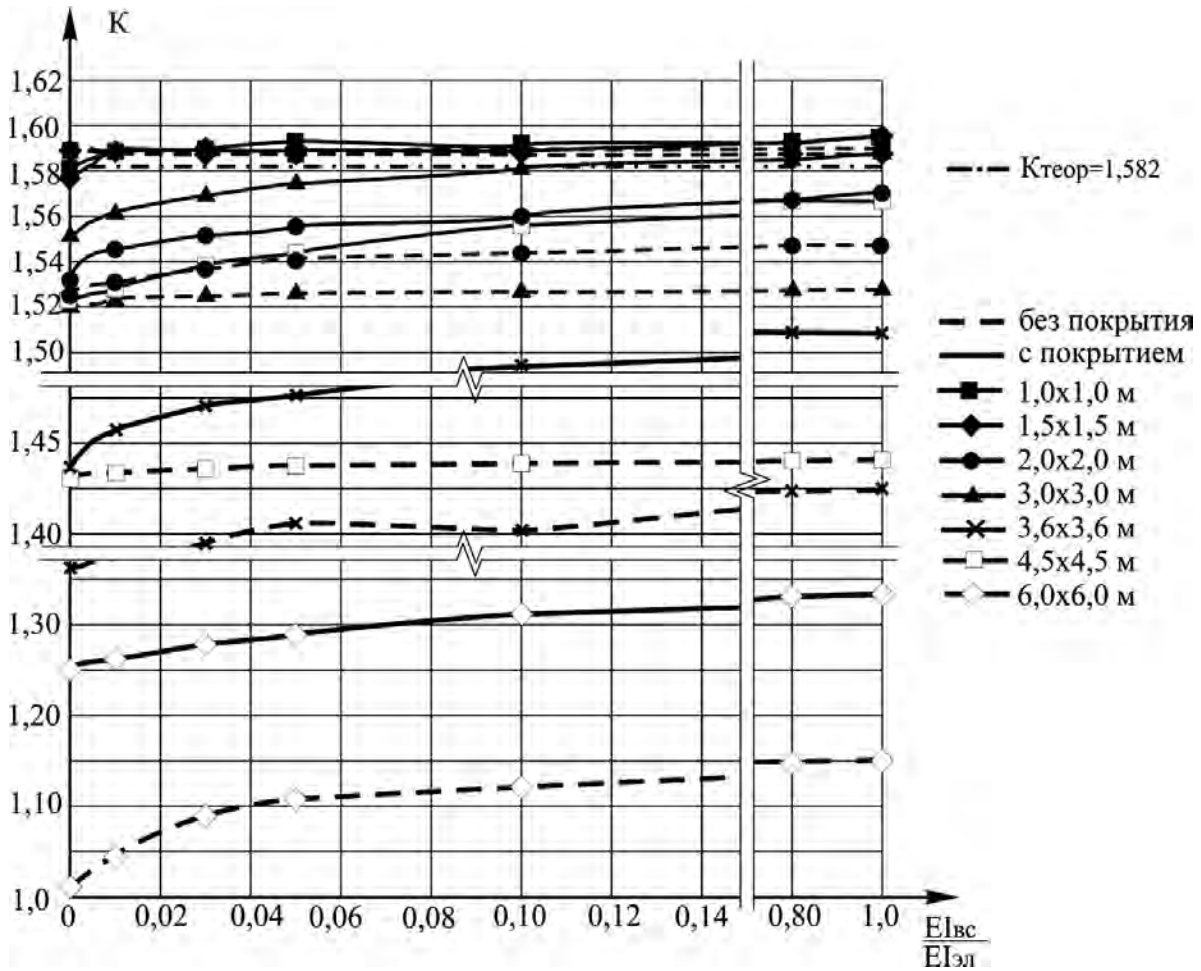


Рисунок 2.25 – Изменение коэффициента К в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента с покрытием сверху и без него при различных размерах ячеек

Сопоставляя результаты исследований изменения коэффициента К можно сделать вывод, что с включением в работу покрытия значение коэффициента К приближается к $К_{теор.}$ для всех размеров ячеек при различной податливости узловых соединений СПБ.

2.3 Результаты исследований систем перекрёстных балок на прямоугольном плане

В данном разделе устанавливается взаимосвязь максимальных прогибов и частот собственных колебаний для систем перекрёстных балок на прямоугольном плане.

По теме данного исследования опубликованы статьи [42, 80, 81, 82].

В качестве расчётной конструкции была принята система перекрёстных

балок на прямоугольном плане с размерами 18×21, 18×24, 18×27, 18×30, 18×33, 18×36 м. Схема соединения элементов, опирание системы, принятые нагрузки аналогичны системам перекрёстных балок на квадратном плане, принятыми в разделе 2.2.

2.3.1 Результаты исследований систем перекрёстных балок в зависимости от жёсткости узловых соединений и размера ячеек на прямоугольном плане

Результаты исследований СПБ на прямоугольном плане при жесткости узловых соединений $EI_{вс}/EI_{эл} = 0,03$ представлены в таблице 2.11

Таблица 2.11 – Значение прогибов (W_0 , мм), основных частот собственных поперечных колебаний (ω, 1/с) и отклонений К от $К_{теор}$ (Δ, %) для различных размеров ячеек в зависимости от размеров СПБ при постоянной податливости узловых соединений

Размеры ячейки, м	Параметр	Размеры системы перекрёстных балок, м					
		18×21	18×24	18×27	18×30	18×33	18×36
1,0×1,0	W_0	7,54020	8,81104	9,61546	10,1232	10,3843	10,5070
	ω	45,4134	41,9909	40,0495	38,8962	38,1818	37,7222
	Δ	-0,20	-0,23	0,31	0,81	1,71	2,68
1,5×1,5	W_0	24,2100	28,2345	30,8686	32,4648	33,3372	33,7130
	ω	25,3595	23,4486	22,3641	21,7196	21,3202	21,0632
	Δ	-0,32	-0,16	0,20	0,82	1,61	2,64
2,0×2,0	W_0	-	37,2781	-	42,7243	-	44,5906
	ω	-	20,2568	-	18,7621	-	18,1941
	Δ	-	1,31	-	2,60	-	3,92
3,0×3,0	W_0	46,8710	54,5318	58,2914	60,4200	61,1201	60,7093
	ω	17,8381	16,6211	16,0006	15,6797	15,5116	15,4230
	Δ	3,90	2,80	3,53	3,80	4,52	6,00
4,5×4,5	W_0	-	-	89,5842	-	-	99,0881
	ω	-	-	12,6742	-	-	11,9257
	Δ	-	-	6,980	-	-	8,27
6,0×6,0	W_0	-	98,7727	-	111,447	-	122,262
	ω	-	11,3407	-	10,4908	-	10,1621
	Δ	-	18,04	-	20,56	-	17,82

Результаты исследований СПБ при другой податливости узловых соединений приведены в приложении Е.

Результаты расчета СПБ с различным соотношением сторон при постоянном соотношение жёсткости вставки к жёсткости элемента самой системы перекрёстных балок равном $EI_{вс}/EI_{эл}$=0,03 представлены на рисунках 2.26…2.28. Рисунки 2.29…2.31 в свою очередь представляют изменение тех же параметров в зависимости от соотношения изгибной жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{эл}$ при размере ячейки 3×3 в каждом случаи прямоугольной системы.

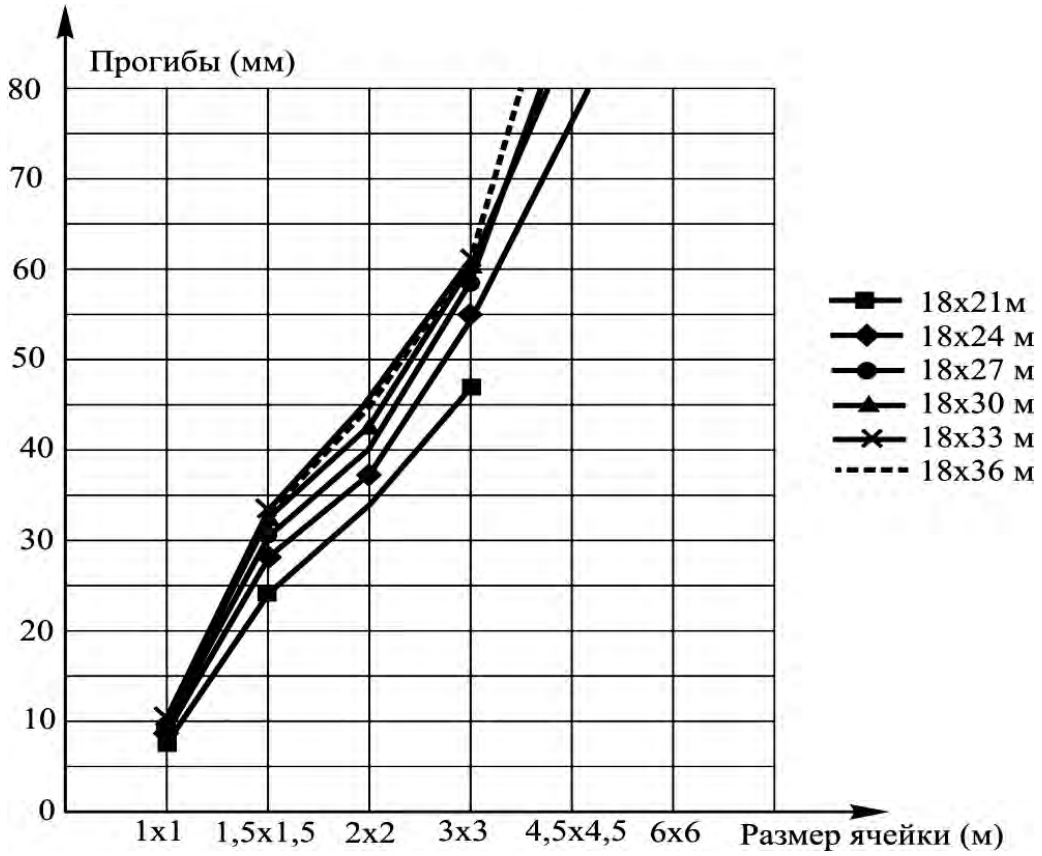


Рисунок 2.26 – Изменение прогибов в зависимости от размеров ячейки

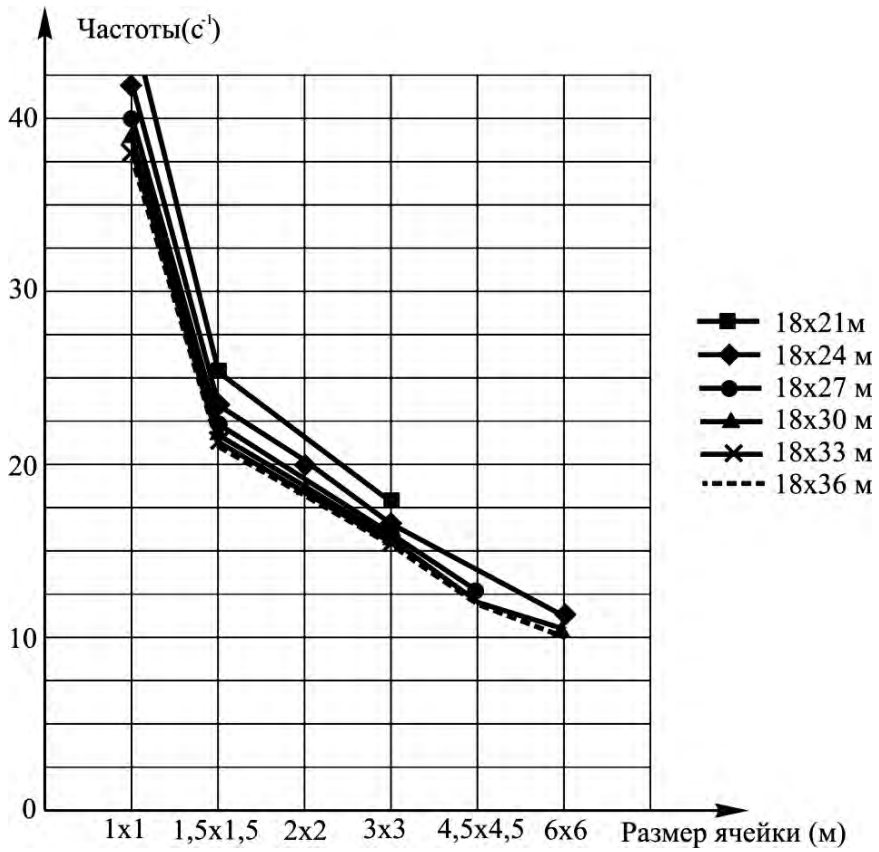


Рисунок 2.27 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от размера ячейки

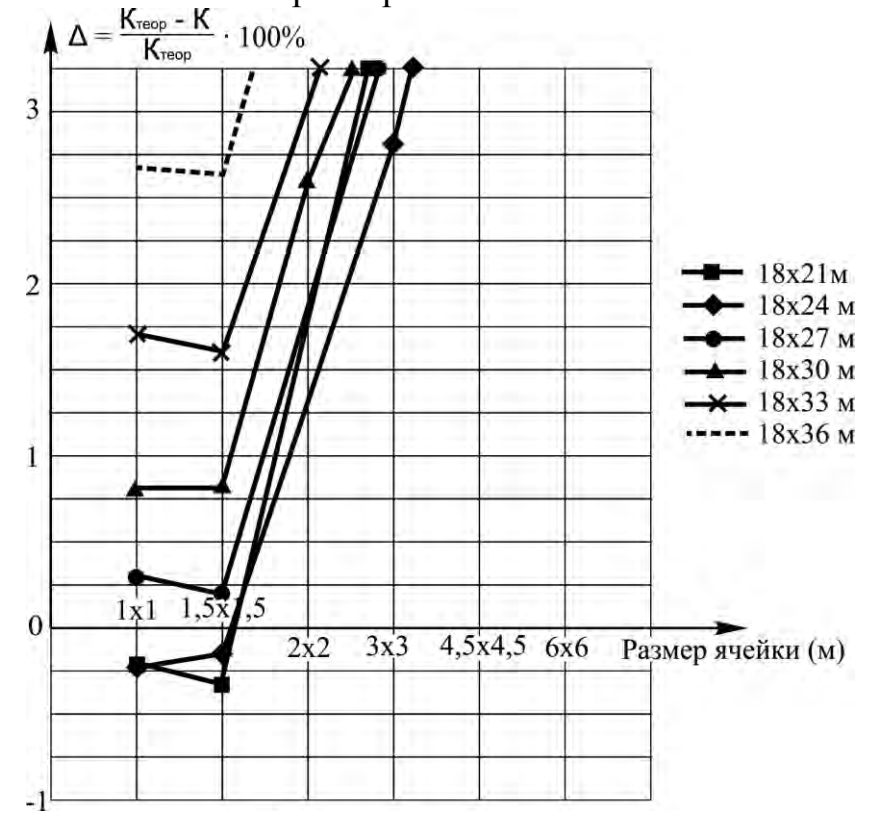


Рисунок 2.28 – Изменение отклонения К от $К_{теор}$ в зависимости от размера ячейки

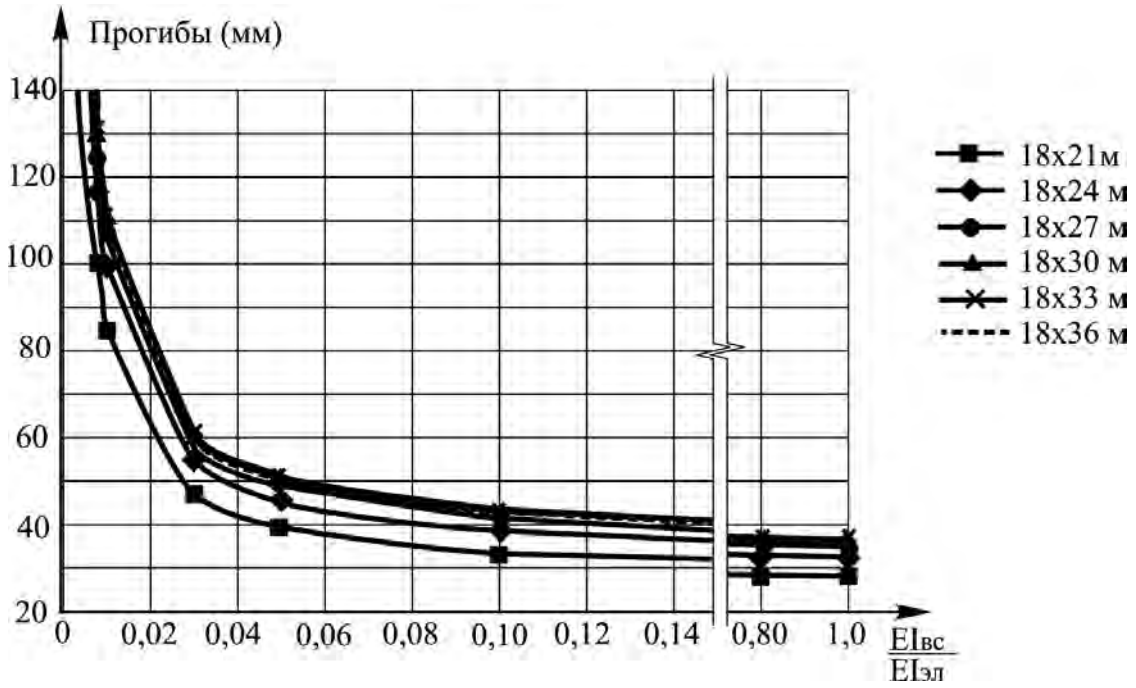


Рисунок 2.29 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

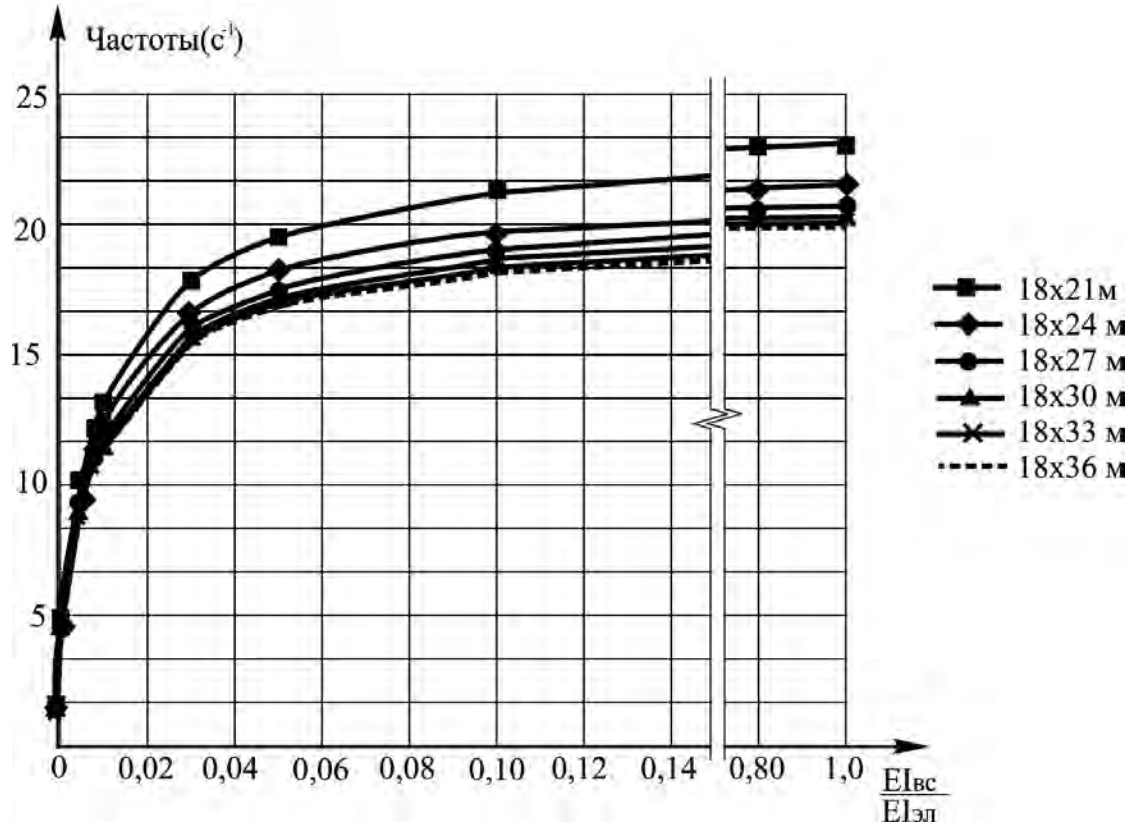


Рисунок 2.30 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

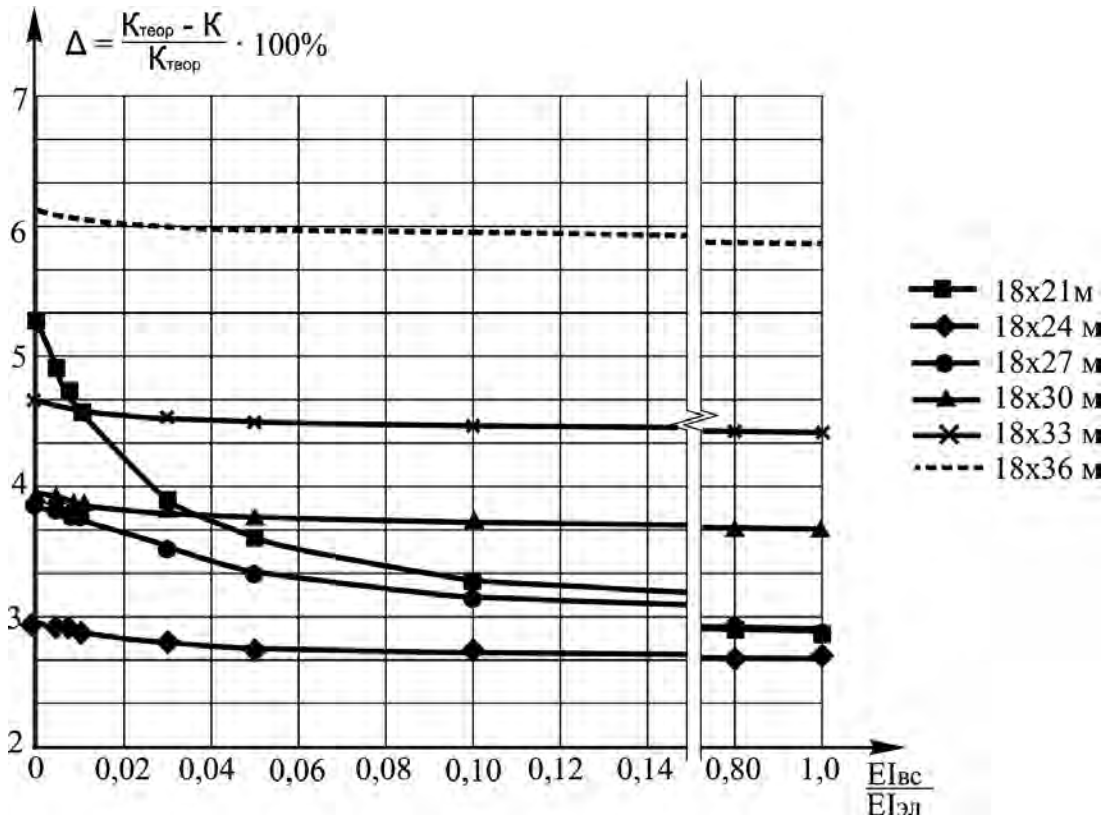


Рисунок 2.31 – Изменение отклонения К от $К_{теор}$ в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

Анализ данных показывает, что с уменьшением размера ячейки система перекрёстных балок по характеру работы приближается к пластинам, и, как следствие, коэффициент К стремиться к значению $К_{теор}$ для прямоугольных пластин с соответствующим соотношением сторон. При минимальном размере ячейки изменение соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента незначительно влияет на изменение коэффициента К. Зависимость коэффициента К от изменения соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента увеличивается при увеличение размера ячейки.

В результате исследований установлено, что с увеличением соотношения сторон прямоугольных системы перекрёстных балок коэффициент К отдаляется от соответствующего теоретического значения для прямоугольных пластин с соответствующим соотношением сторон. При этом с уменьшением размеров ячеек коэффициент К приближается к теоретическому значению коэффициента. Увеличение соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{эл}$ ведет к приближению коэффициента К к теоретическому.

2.3.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок на прямоугольном плане в зависимости от схемы опирания и размера ячеек

Проведены исследования с целью выявления взаимосвязи между максимальным прогибом и собственной частотой основного тона поперечных колебаний системы перекрёстных балок на прямоугольном плане с различными размерами ячеек, с постоянной податливостью узловых соединений конструкции при изменении схемы опирания (количества опор).

Для исследований была принята постоянная податливость узловых соединений, соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента было принято $EI_{вс}/EI_{эл}$=0,03.

Результаты исследований СПБ размером в плане 18×21 м и размером ячеек 1,0×1,0 м, представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Значения прогибов (W_0, мм), основных частот собственных поперечных колебаний (ω, 1/с) и отклонения $К_{расч}$ от $К_{теор}$ (Δ, %) для различных схем опирания системы, размером в плане 18×21 м с размерами ячеек 1,0×1,0 м при постоянной податливости узловых соединений

Параметр	Количество опор по короткой стороне/количество опор по длинной стороне (c/d)					
	19/22	10/8	7/8	4/4	3/4	2/2
W_0, мм	7,5402	7,5452	7,5462	7,6717	7,7626	34,3914
ω, 1/с	45,4134	45,3974	45,3935	45,0247	44,7412	18,3819
Δ, %	-0,20	-0,20	-0,19	-0,21	-0,13	25,12

Результаты исследований СПБ других размеров в плане и с различным размером ячеек приведены в приложении Ж.

По результатам исследований построены графики изменение прогибов и частот колебаний, а также отклонения в процентах коэффициента К от его теоретического значения в зависимости от соотношения количества опор по короткой стороне конструкции к количеству опор по длинной стороне.

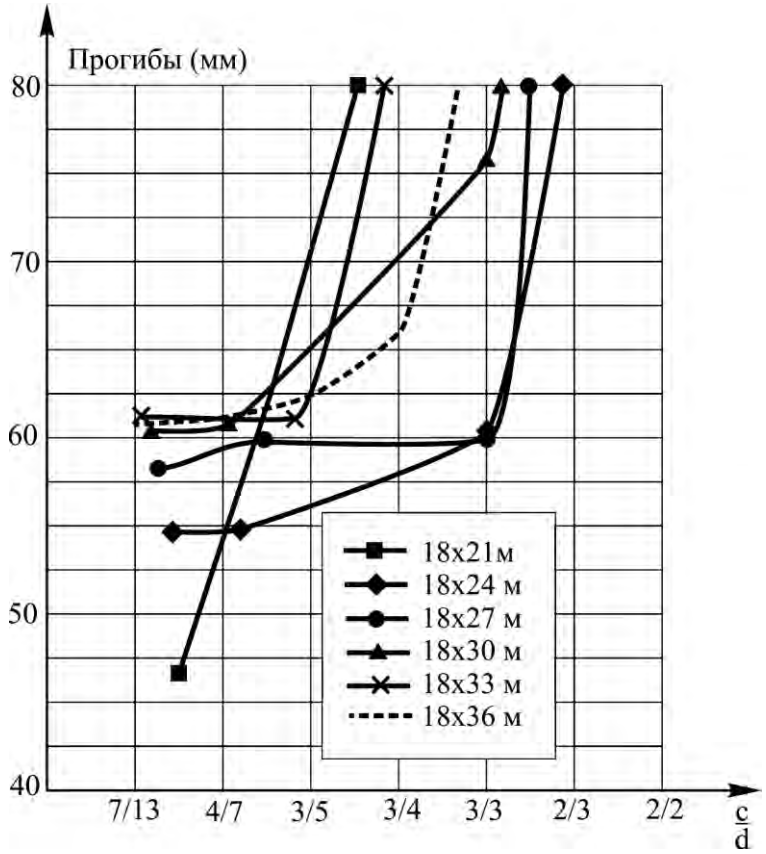


Рисунок 2.32 – Изменение прогибов в зависимости от количества опор по короткой стороне к количеству опор по длинной стороне

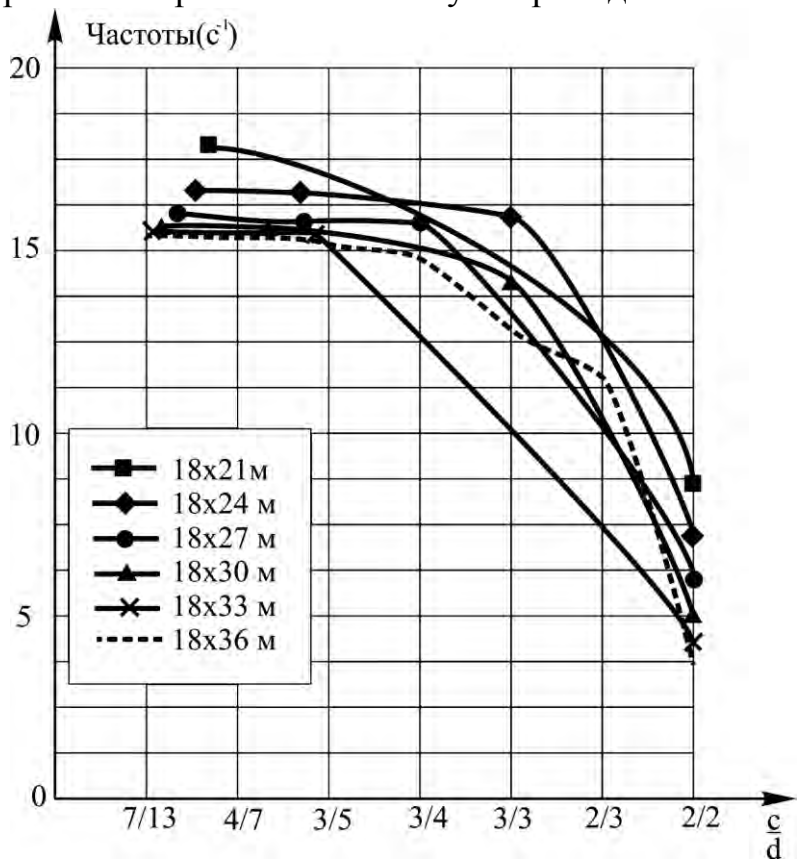


Рисунок 2.33 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от количества опор по короткой стороне к количеству опор по длинной стороне

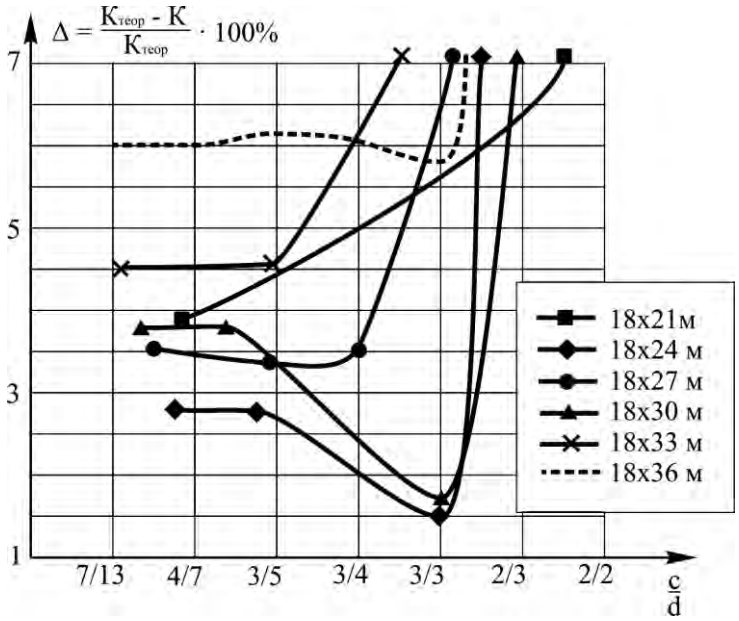


Рисунок 2.34 – Отклонения К от $К_{теор}$ в зависимости от количества опор по короткой стороне к количеству опор по длинной стороне

В результате исследований установлено, что с уменьшением количества опор в прямоугольных системах перекрёстных балок коэффициент К отдаляется от своего теоретического значения. При опирании конструкции только по углам при соотношение сторон 18×21м максимальное отклонение коэффициента К от теоретического значения составило при размере ячеек 1×1м – 25,12%; при 18×24м – 21,73%; 18×27м – 20,30%; 18×30м – 19,57%; 18×33м – 19,36 %; 18×36м – 19,15%. Кроме того установлено, что расчётные значения К для СПБ соответствуют теоретическому значению в пределах 5% для прямоугольных изотропных пластин постоянной толщины при выполнении условий, приведённых в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Соответствие значений К для СПБ значениям $К_{теор}$ для прямоугольных изотропных пластин постоянной толщины

Размер систем перекрёстных балок, м	18×21	18×24	18×27	18×30	18×33	18×36
Соотношение количества опор по короткой стороне к количеству опор по длинной стороне (c/d)	> 7/8	> 3/3	> 3/4	> 3/3	> 4/12	> 3/3
Отклонение расчетного значения $К_{расч}$ от теоретического, %	3,9	2,8	3,54	3,81	4,57	6,14

2.3.3 Результаты исследований систем перекрёстных балок на прямоугольном плане с покрытием по верхнему поясу

В данном разделе проведены исследования с целью выявления взаимосвязи максимальных прогибов и частот собственных колебаний для систем перекрёстных балок на прямоугольном плане с покрытием по верхнему поясу при различных размерах ячеек и при изменении податливости узловых соединений конструкции.

Схема учета включения в работу элементов покрытия аналогична приведённой в разделе 2.2.3

Результаты исследований СПБ на прямоугольном плане с размером ячеек 1,0×1,0 м с покрытием по верхнему поясу для жесткости узловых соединений $EI_{вс}/EI_{эл} = 0,03$ представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Значение прогибов (W_0, мм), основных частот собственных поперечных колебаний (ω, 1/с) и отклонений $К_{расч}$ от $К_{теор}$ (Δ, %) для различных размеров ячеек в зависимости от размеров СПБ при постоянной податливости узловых соединений

Размеры ячейки, м	Параметр	Размеры системы перекрёстных балок, м					
		18×21	18×24	18×27	18×30	18×33	18×36
1,0×1,0	W_0	3,39	4,08	4,61	5,02	5,32	5,54
	ω	67,7197	61,7162	57,8680	55,2790	53,4652	52,1501
	Δ	-0,17	-0,26	0,21	0,65	1,26	1,92
1,5×1,5	W_0	4,01	4,85	5,51	6,03	6,42	6,71
	ω	62,1700	56,5693	52,9247	50,4396	48,6775	47,3865
	Δ	0,13	-0,13	0,24	0,65	1,23	1,92
2,0×2,0	W_0	-	5,4	-	6,72	-	7,54
	ω	-	53,4189	-	47,5282	-	44,5536
	Δ	-	0,58	-	1,69	-	2,57
3,0×3,0	W_0	5,26	6,37	7,25	8,21	8,52	8,95
	ω	54,0206	49,1603	45,9370	43,7028	42,0968	40,9069
	Δ	1,09	0,68	1,11	-1,55	1,97	2,51
4,5×4,5	W_0	-	-	8,73	-	-	10,72
	ω	-	-	41,6329	-	-	37,1438
	Δ	-	-	2,19	-	-	3,73
6,0×6,0	W_0	-	8,92	-	10,41	-	12,13
	ω	-	40,6975	-	36,3462	-	34,0986
	Δ	-	4,68	-	10,94	-	8,19

Результаты исследований СПБ с различной податливостью узловых соединений приведены в приложении И.

Результаты расчета СПБ с различным соотношением сторон при постоянном соотношении жёсткости вставки к жёсткости элемента самой системы перекрёстных балок равном $EI_{вс}/EI_{эл}$=0,03 представлены на рисунках 2.35…2.37. Рисунки 2.38…2.40, в свою очередь, представляют изменение тех же параметров в зависимости от соотношения изгибной жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{эл}$ при размере ячейки 3×3 в каждом случаи прямоугольной системы.

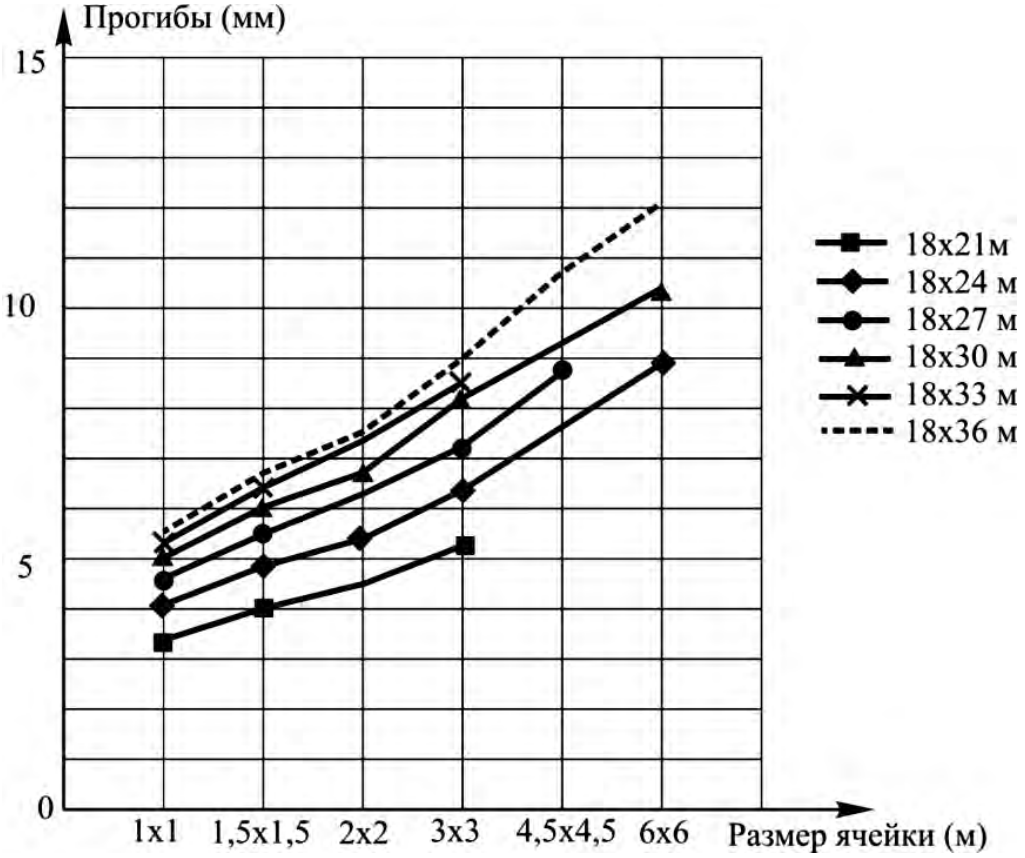


Рисунок 2.35 – Изменение прогибов в зависимости от размеров ячейки с покрытием СПБ по верхнему поясу

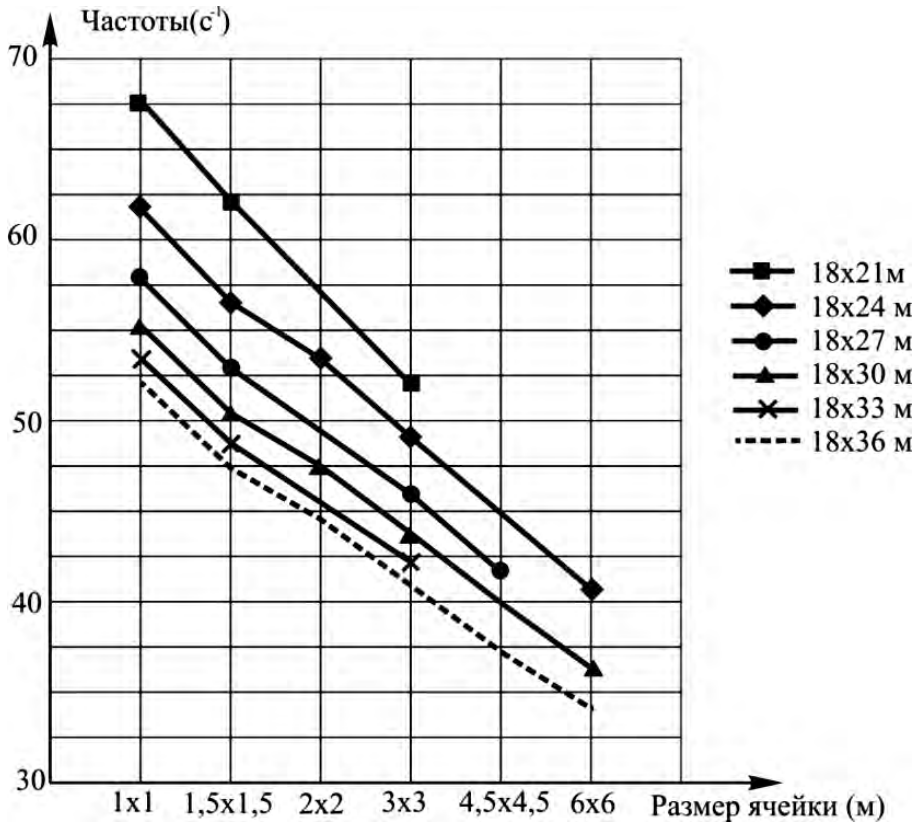


Рисунок 2.36 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от размера ячейки с покрытием СПБ по верхнему поясу

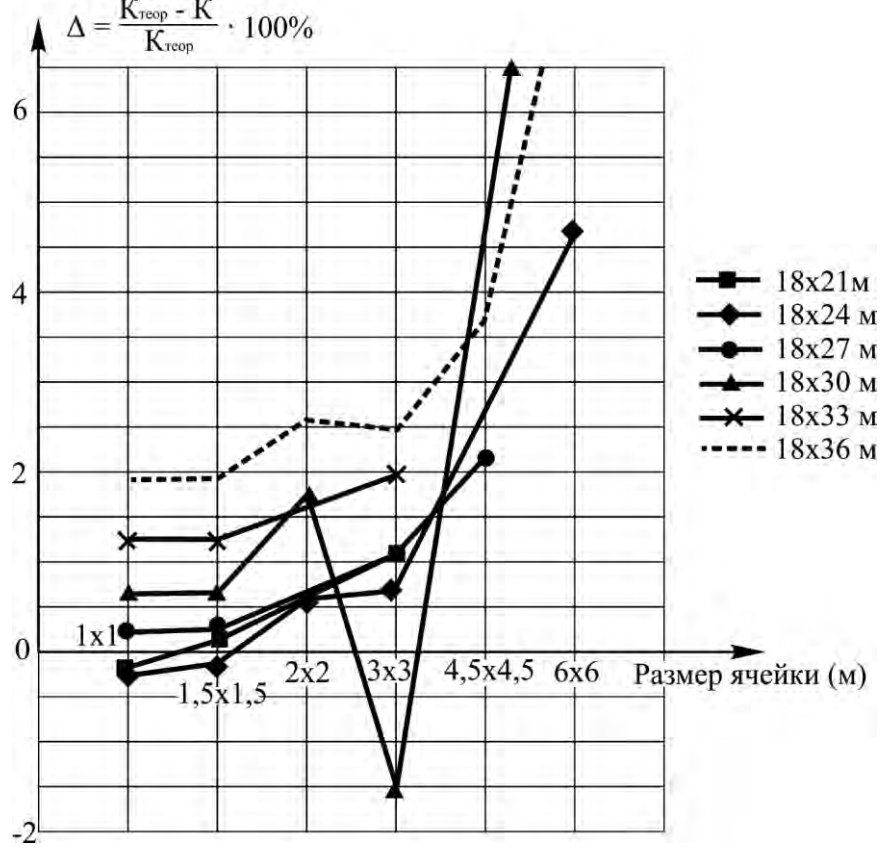


Рисунок 2.37 – Изменение К от $К_{теор}$ в зависимости от размера ячейки с покрытием СПБ по верхнему поясу

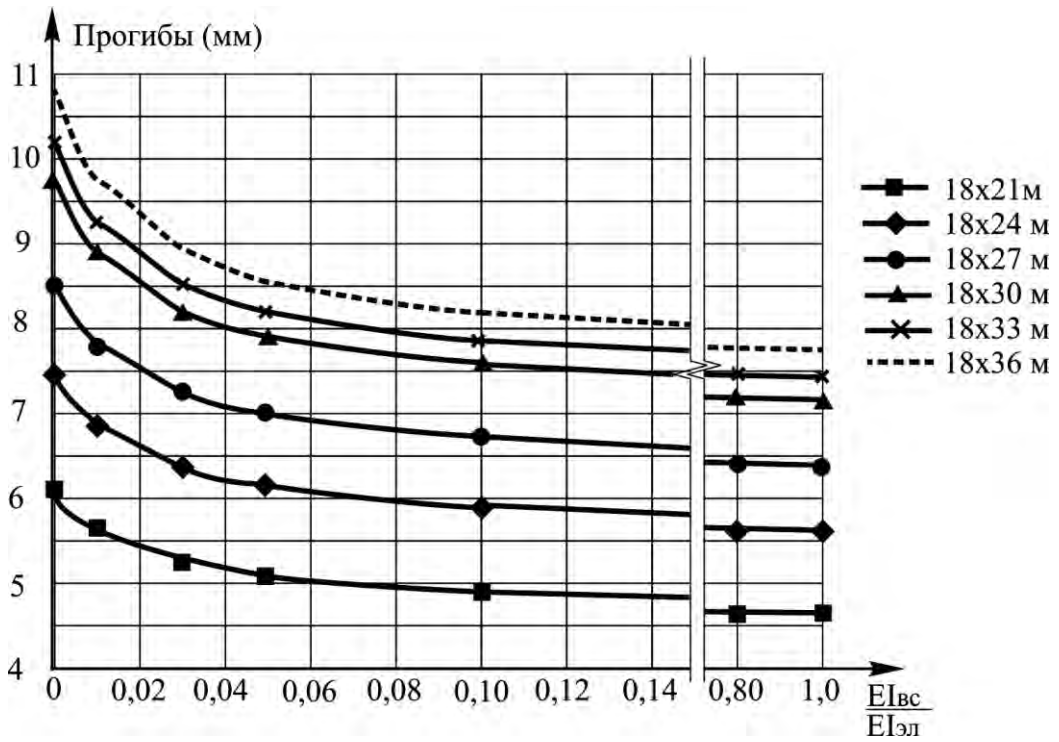


Рисунок 2.38 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента с покрытием СПБ по верхнему поясу

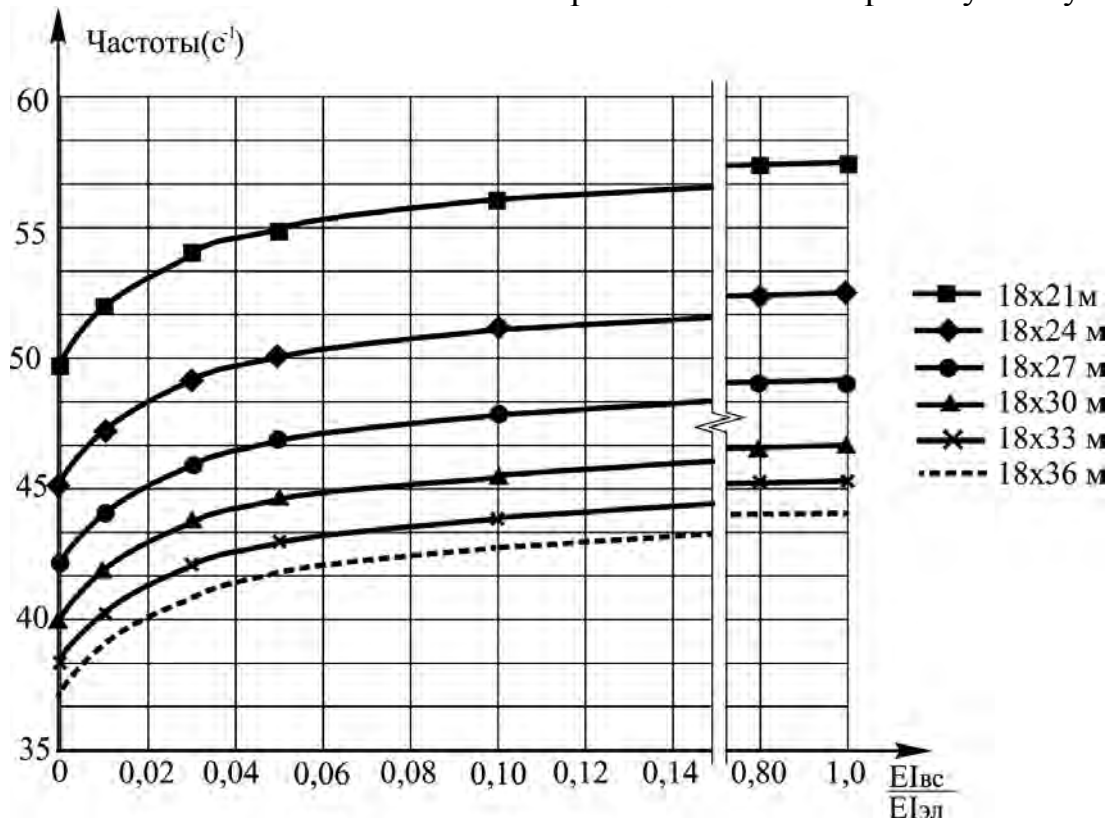


Рисунок 2.39 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента с покрытием СПБ по верхнему поясу

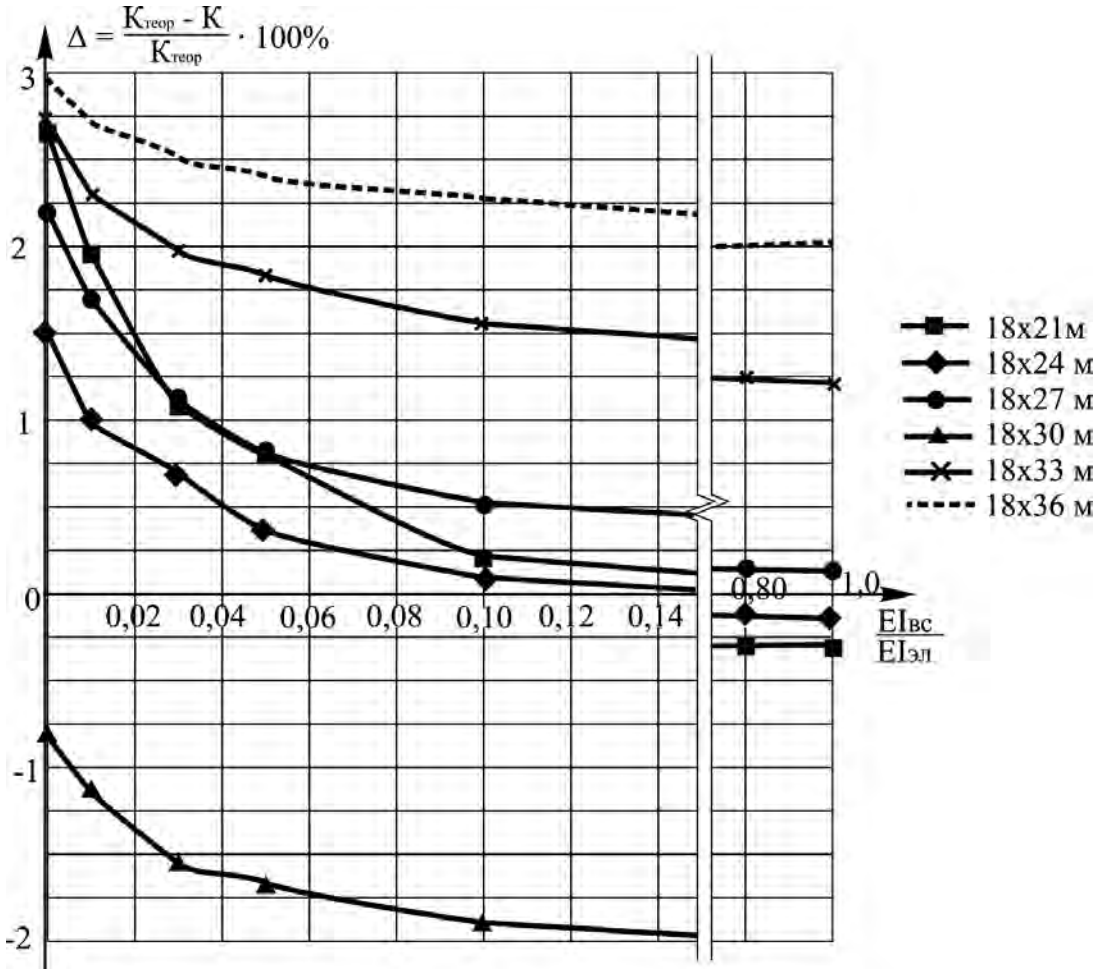


Рисунок 2.40 – Изменение отклонения К от $K_{теор}$ в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента с покрытием СПБ по верхнему поясу

Анализ данных показывает, что с уменьшением размера ячейки работа систем перекрёстных балок стремится к работе сплошных изотропных пластин, и, как следствие, коэффициент К стремится к значению $K_{теор}$ для прямоугольных пластин с соответствующим соотношением сторон. При минимальном размере ячейки изменение соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента незначительно влияет на изменение коэффициента К. Зависимость коэффициента К от изменения соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента увеличивается при увеличении размера ячейки.

В результате исследований установлено, что с увеличением соотношения сторон прямоугольных системы перекрёстных балок коэффициент К отдаляется от своего теоретического значения. При этом с уменьшением размеров ячеек коэффициент К приближается к теоретическому значению коэффициента. Также увеличение соотношения жёсткости вставки к жёсткости

элемента $EI_{вс}/EI_{эл}$ ведет к приближению коэффициента К к теоретическому.

Результаты исследований частот собственных колебаний и прогибов (рисунки 2.38 и 2.39) показывают, что их наиболее интенсивное изменение происходит в диапазоне соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{эл}$ от 0 до 0,12. При больших соотношениях жёсткостей вставки и элемента влияние податливости узловых соединений практически не сказывается на динамических и жесткостных параметрах системы перекрёстных балок.

При включении в работу покрытия по верхнему поясу прогибы конструкции уменьшаются, а частоты увеличиваются. Это связано с повышением жёсткости всей системы в целом, а по характеру работы СПБ приближается к пластинам.

2.4 Выводы по главе 2

1. Численными методами установлено, что интегральные физические характеристики систем перекрёстных балок из клееной древесины (максимальный прогиб от действия равномерно распределённой нагрузки W_0 и основная частота колебаний в ненагруженном состоянии ω) связаны между собой функциональной зависимостью:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{m}. \qquad (2.19)$$

2. Для систем перекрёстных балок с размерами ячеек $a/l < 0{,}17$ (a – размер ячейки, l – размер в плане системы перекрёстных балок) коэффициент К с точностью до 3,78% соответствует теоретическому значению для квадратных изотропных пластин постоянной толщины независимо от соотношения жесткости вставки к жёсткости элемента. При бóльших соотношениях a/l функциональная зависимость (2.19) даёт существенную погрешность: отклонение коэффициент К от теоретического при $0{,}17<a/l \leq 0{,}20$ составляет до 14,06%, при $0{,}20<a/l \leq 0{,}25$ до 9,39%, при $0{,}25<a/l \leq 0{,}33$ до 36,36%.

3. При соотношении n/m >0,4 (где n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов по одной стороне) и $a/l < 0{,}17$ коэффициент К с точностью до 7,55% соответствует теоретическому

значению для квадратных изотропных пластин постоянной толщины. При бóльших соотношениях n/m и *a/l* функциональная зависимость (2.19) даёт существенную погрешность: отклонение коэффициент К от теоретического при 0,17<*a/l* ≤0,25 и n/m >0,4 составляет до 11,57%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 и n/m >0,5 до 31,24%, при меньших значениях n/m для соответствующих a/l отклонение составляет до 29,98%.

4. При включении в работу СПБ элементов покрытия в виде изотропных пластин жёсткость конструкции увеличивается, на что указывает увеличение частот собственных колебаний и снижением прогибов. Характер изменения прогибов, частот колебаний и коэффициента К аналогичен изменению этих параметров конструкции без элементов покрытия. С покрытием значение коэффициента К более близко к теоретическому, разница между значениями с покрытием и без составляет при *a/l* ≤0,17 2,85%, при 0,17<*a/l* ≤0,20 составляет до 4,68%, при 0,20<*a/l* ≤0,25 до 6,23%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 до 12,55%.

Податливость связей, крепящих элементы покрытия к системе перекрёстных балок, существенно влияет на прогибы и частоты колебаний конструкции. С увеличение жёсткости связей жёсткость всей конструкции увеличивается, а коэффициент К практически не изменяется. Отклонение коэффициента К от теоретического при *a/l* ≤0,17 составляет до 2,58%, 0,17<*a/l* ≤0,20 составляет до 9,36%, при 0,20<*a/l* ≤0,25 до 5,59%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 до 23,09%.

С увеличением жёсткости элементов покрытия увеличивается жёсткость конструкции, а коэффициент К практически не изменяется. Отклонение коэффициента К от теоретического при *a/l* ≤0,17 составляет до 1,92%, 0,17<*a/l* ≤0,20 составляет до 7,57%, при 0,20<*a/l* ≤0,25 до 3,21%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 до 19,56%.

5. Для систем перекрёстных балок на прямоугольном плане с соотношением сторон в плане l_1/l_2≥0,75 (l_1 – короткая сторона, l_2– длинная сторона) и *a/l* <0,33 коэффициент К с точностью до 5,33% соответствует теоретическому значению для прямоугольных изотропных пластин постоянной толщины. При 0,5≤l_1/l_2 ≤0,66 и *a/l* ≤0,25 м коэффициент К отклоняется от теоретического значения от 0,25 до 6,18%, при других значениях размера ячейки функциональная зависимость (2.18) даёт существенную погрешность: откло-

нение коэффициента К от теоретического при $l_1/l_2 \geq 0{,}75$ и $a/l > 0{,}33$ составляет до 24,50%, при $0{,}5 \leq l_1/l_2 \leq 0{,}66$ и $0{,}25 < a/l \leq 0{,}33$ до 26,76%.

6. Установлено, что коэффициент К для систем размером l_1/l_2=0,86 (где l_1 – короткая сторона СПБ, l_2 – длинная сторона СПБ) с точностью до 3,9% соответствует теоретическому значению для прямоугольных изотропных пластин постоянной толщины при $c/d > 7/8$ (где: c – количество опор по короткой стороне конструкции; d – количество опор по длинной стороне конструкции); для систем размером l_1/l_2=0,67 с точностью до 3,54% при $c/d > 3/4$; для систем размером l_1/l_2=0,54 с точностью до 4,57% при $c/d > 4/12$; для систем размером l_1/l_2=0,67, l_1/l_2=0,60, l_1/l_2=0,50 при $c/d > 3/3$ коэффициент отклоняется от теоретического значения с точностью от 2,80 до 6,14%.

7. При включении в работу СПБ на прямоугольном плане элементов покрытия в виде изотропных пластин жёсткость конструкции увеличивается, на что указывает увеличение частот собственных колебаний и снижением прогибов. Характер изменения прогибов, частот колебаний и коэффициента К аналогичен изменению этих параметров конструкции без элементов покрытия. При включении покрытия в работу функциональная зависимость (2.19) даёт меньшую погрешность, чем при его отсутствии: отклонение коэффициента К от теоретического при $l_1/l_2 \geq 0{,}75$ и $a/l < 0{,}33$ составляет до 2,66%, а при a/l =0,33 составляет до 7,55%, при $0{,}5 \leq l_1/l_2 \leq 0{,}66$ и $a/l < 0{,}33$ до 4,42%, а при $0{,}25 < a/l \leq 0{,}33$ до 13,50%.

3 ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА И СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ ПЕРЕКРЁСТНЫХ БАЛОК НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ

3.1 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане при изменении податливости узловых соединений

Как отмечалось выше, профессор В.И. Коробко вывел функциональную зависимость для упругих изотропных пластин постоянной толщины и произвольной формы:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{m}, \tag{3.1}$$

где m – равномерно распределённая по площади масса пластины.

В данном разделе рассматривается применимость этой закономерности для систем перекрёстных балок (СПБ) с упруго-податливыми узлами на треугольном плане.

По теме данного исследования опубликованы статьи [83,86].

В качестве расчётной конструкции была принята система перекрёстных балок в виде правильного треугольника со сторонами 18 м (рисунок 3.1). Размеры ячеек *a* составляли 1м, 1,5м, 2м, 3 м, 4,5 м и 6 м. Элементы в узлах соединяются между собой с помощью стальных уголков и стальных нагелей (болтов, шпилек). Конструкция узла приведена на рисунке 3.2.

По контуру система перекрёстных балок опиралась в контурных узлах на шарнирные опоры. Постоянная нагрузка принята от собственного веса системы перекрёстных балок (сечение дощатоклееных элементов системы принято постоянным $b \times h$=160 × 1221 мм) $q_{св}$ = 0,187Кн/м^2. Снеговая нагрузка принималась по нормам для Орловской области [68, 70] S_g = 1,8 кН/м^2. Суммарная равномерно распределённая статическая нагрузка составила q = 2,143 кН/м^2. Для статического расчёта, нагрузка прикладывалась в узлах системы.

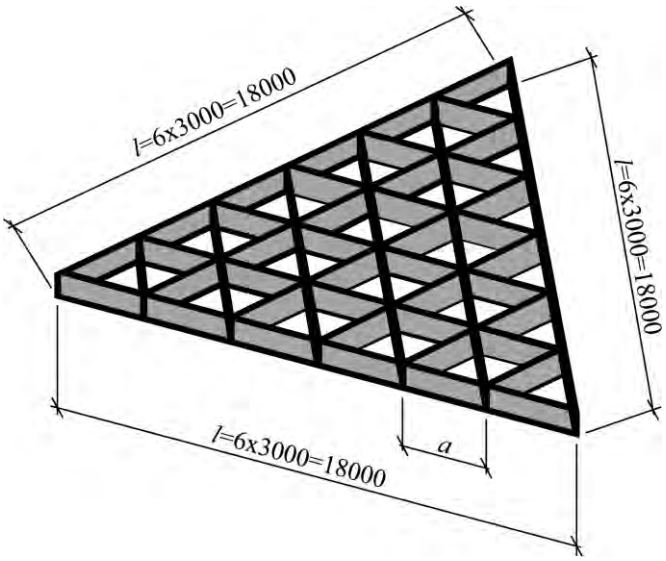


Рисунок 3.1 – Схема системы перекрёстных балок на треугольном плане

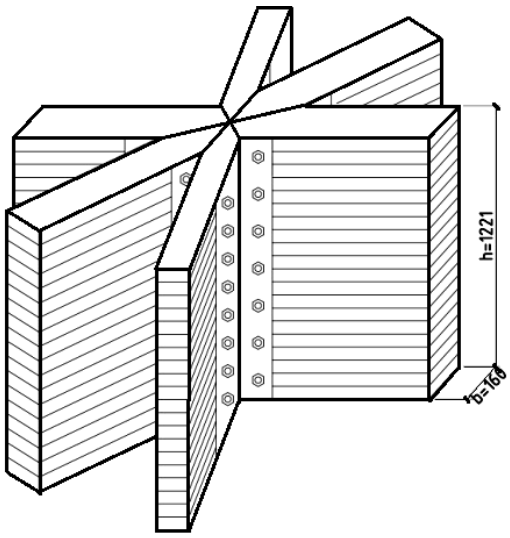


Рисунок 3.2 – Узел примыкания элементов

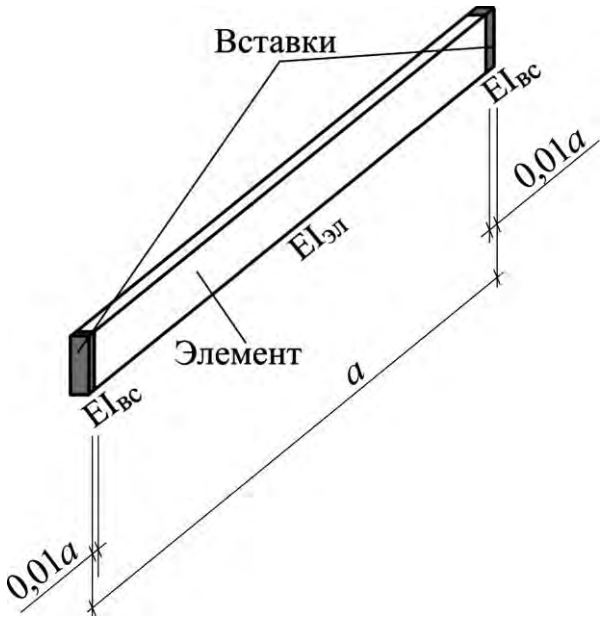


Рисунок 3.3 – Схема элемента с вставками

Для определения собственных частот колебаний в узлы системы прикладывались сосредоточенные грузы, интенсивность которых рассчитывалась по фактическому собственному весу конструкции. Модуль упругости клееной древесины в расчётах принимался по нормам [69, 71] E= 10000 МПа.

Для оценки степени влияния податливости узловых соединений разработан конечный элемент с вставками по концам (рисунок 3.3). Длина каждого такого конечного элемента зависит от размеров ячейки и соответственно составила a = 1,0 м, 1,5 м, 2,0 м, 3,0 м, 4,5 м и 6,0 м, длина вставки всех конечных элементов принята 0,01a. Изгибная жёсткость элемента принята равной жесткости дощатоклееного сечения $b \times h$=160×1221 мм, а изгибная жёсткость вставок варьировалась в границах $EI_{вс}/EI_{эл}$ от 0 до 1. Стоит отметить, что при $EI_{вс}/EI_{эл}$ = 0 в узловых соединениях системы перекрёстных

балок образуется шарнир, а при $EI_{вс}/EI_{эл} = 1$ податливость в узлах отсутствует.

Исследования проводились методом конечных элементов. Расчет выполнялся в программном комплексе SCAD. В результате расчёта определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок.

Отклонение фактических значений коэффициента К от теоретического вычислялось по формуле:

$$\Delta = \frac{K_{теор} - K}{K_{теор}} \cdot 100\% . \qquad (3.2)$$

Коэффициент $K_{теор}$ для треугольных пластин, шарнирно опертых по контуру, составляет $K_{теор} = 1{,}603$.

Проведены исследования с целью выявления взаимосвязи между максимальным прогибом и собственной частотой основного тона поперечных колебаний системы перекрёстных балок на треугольном плане с различными размерами ячеек при изменении податливости узловых соединений конструкции.

Результаты исследований СПБ размером в плане 18×18×18м с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты численных исследований системы перекрёстных балок на треугольном плане с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	37,92	20,34456	1,5999	1,603	0,19
2	0,001	3,95	63,06703	1,6010		0,13
3	0,005	0,93	130,188	1,6049		-0,12
4	0,008	0,65	156,2521	1,6071		-0,25
5	0,01	0,55	169,1659	1,6083		-0,33
6	0,03	0,30	230,0317	1,6155		-0,78
7	0,05	0,25	252,4904	1,6187		-0,98
8	0,1	0,21	274,471	1,6222		-1,19
9	0,2	0,19	287,8755	1,6244		-1,33

Продолжение таблицы 3.1

10	0,3	0,19	292,8045	1,6252		-1,39
11	0,5	0,18	296,9378	1,6259		-1,43
12	0,6	0,18	297,9992	1,6261		-1,44
13	0,8	0,18	299,3422	1,6263		-1,46
14	1	0,18	300,157	1,6265		-1,47

Результаты исследований СПБ с другими размерами ячеек приведены в приложении К.

По данным таблицы 3.1 и данным приложения К построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и К (рисунки 3.4…3.6) в зависимости от размеров ячейки и величины податливости связей.

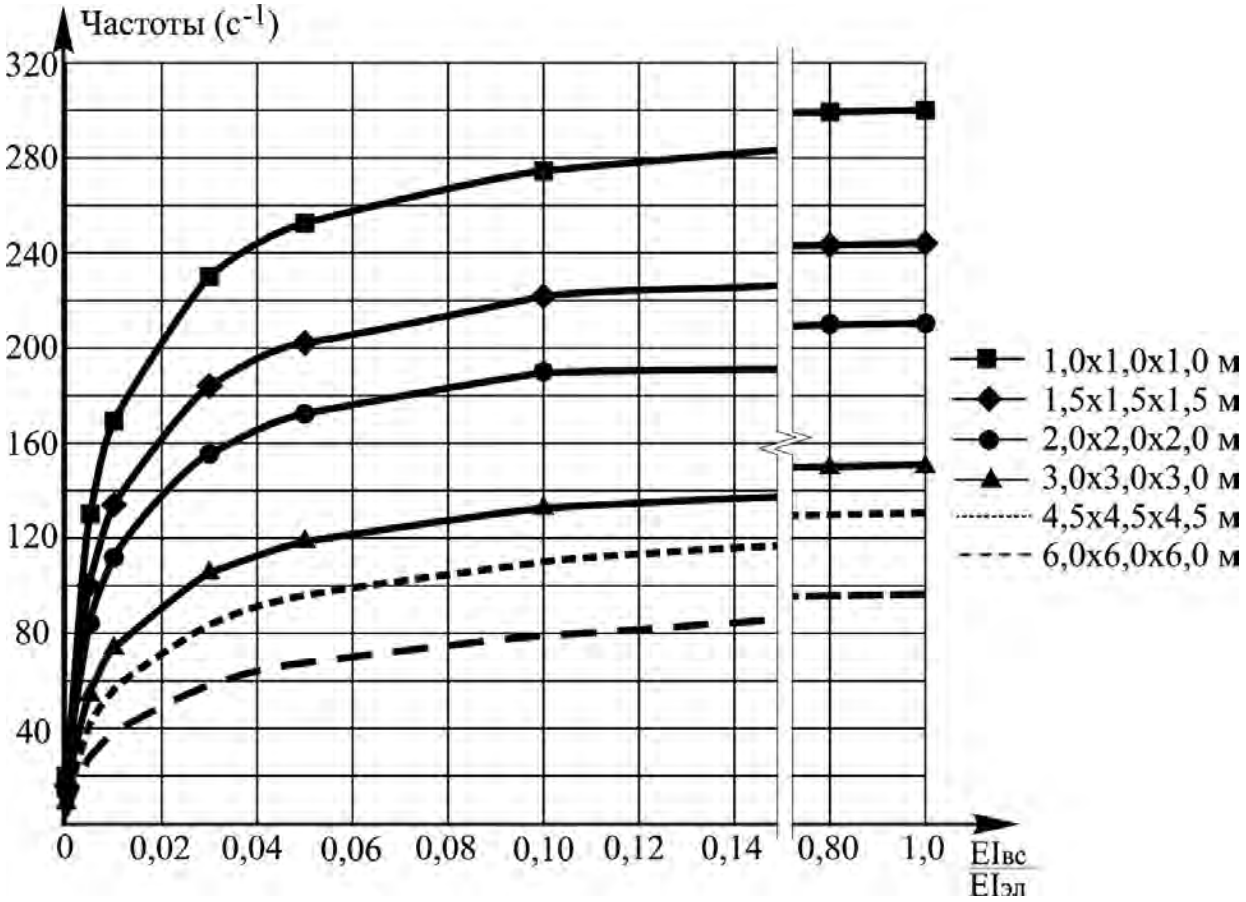


Рисунок 3.4 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек

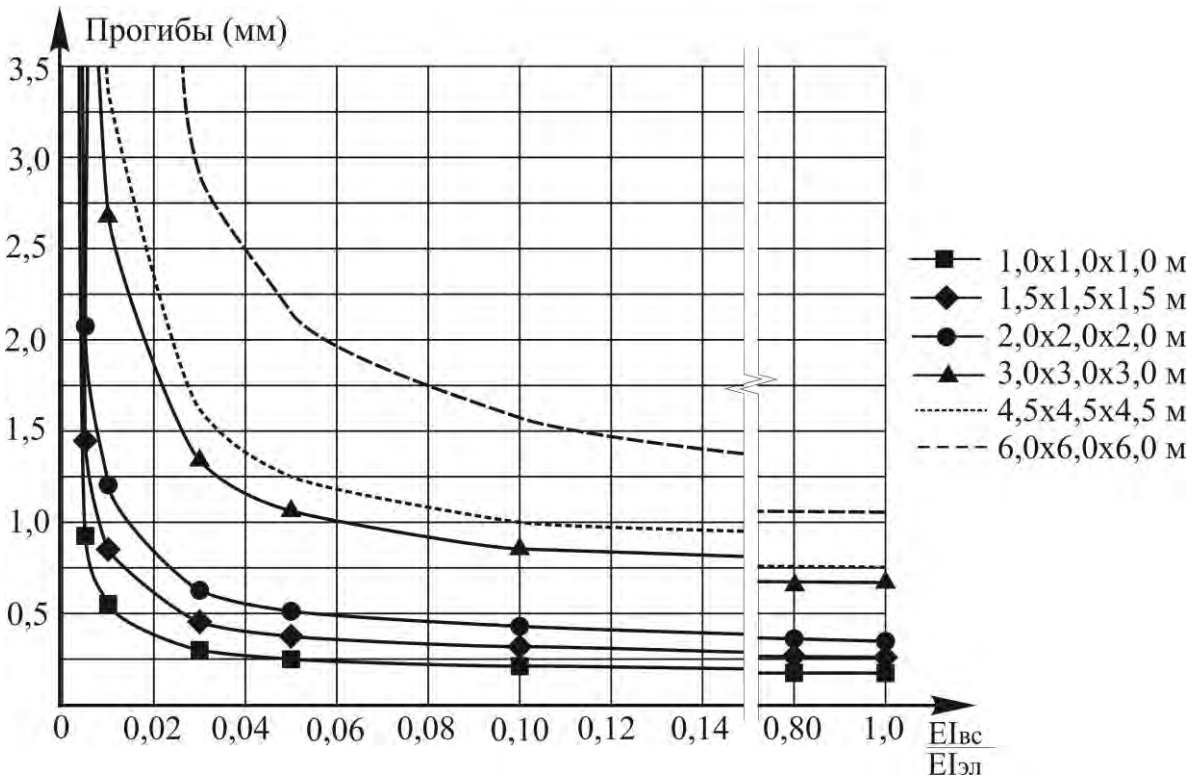


Рисунок 3.5– Изменение прогибов в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек

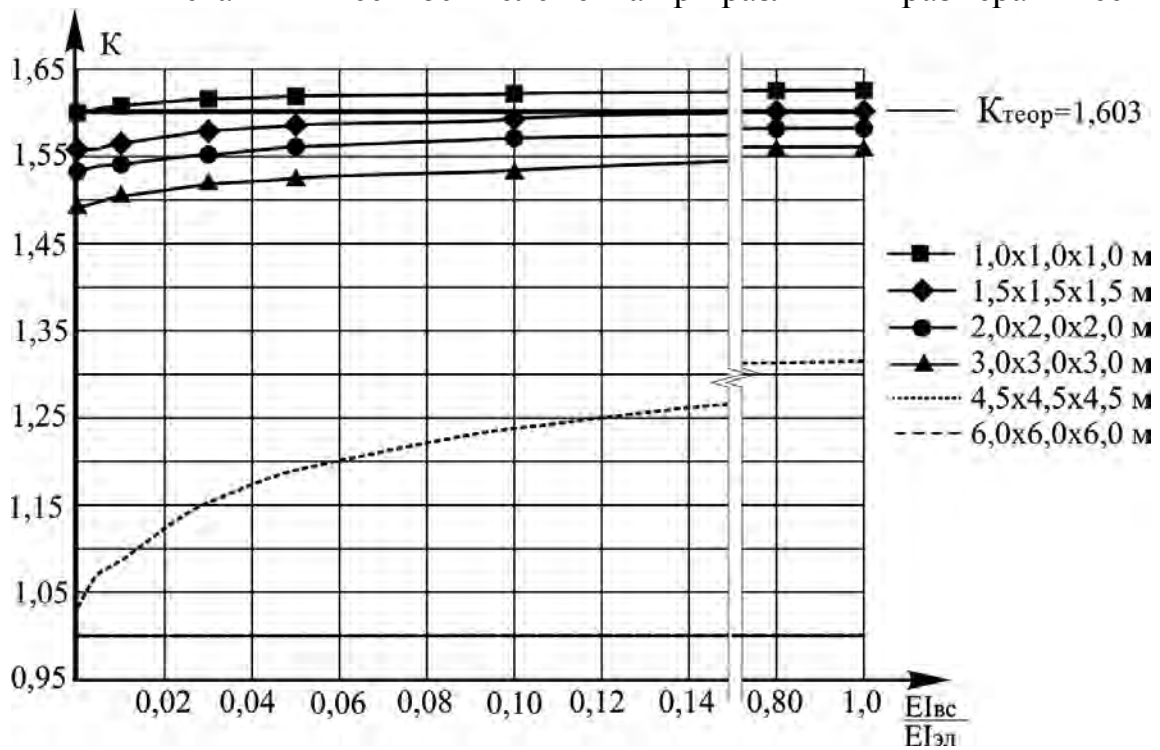


Рисунок 3.6 – Изменение коэффициента К в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек

Анализ данных показывает, что с уменьшением размера ячейки система перекрёстных балок стремится к пластинам, и, как следствие, коэффици-

ент К стремится к значению $К_{теор.}$ для треугольных пластин. Установлено, что изменение соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента незначительно влияет на изменение коэффициента К. Для систем перекрёстных балок на треугольном плане с размерами ячеек $a/l < 0,17$ (a – размер ячейки, l – размер в плане системы перекрёстных балок) коэффициент К с точностью до 7,01% соответствует теоретическому значению для треугольных изотропных пластин постоянной толщины независимо от соотношения жесткости вставки к жёсткости элемента. При бóльших соотношениях a/l функциональная зависимость (3.1) даёт существенную погрешность: отклонение коэффициент К от теоретического при $0,17<a/l \leq 0,25$ составляет до 35,67%, при $0,25<a/l \leq 0,33$ до 37,62%.

3.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане в зависимости от схемы опирания

Проведены исследования с целью выявления взаимосвязи максимальных прогибов и частот свободных колебаний системы перекрёстных балок на треугольном плане при изменяемом размере ячеек с постоянной податливостью узловых соединений конструкции при изменении схемы опирания (количества опор).

Для исследований была принята постоянная податливость узловых соединений; соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента было принято $EI_{вс}/EI_{эл}=0,03$. Результаты исследования СПБ размером в плане 18×18×18 м с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м и различной схемой опирания представлены в таблице 3.2. Принятые в таблицах обозначения: n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов СПБ по одной стороне.

Таблица 3.2 – Результаты численных исследований СПБ размером в плане 18×18×18 м с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$К_{теор}$	Отклонение Δ (%)
1	1	0,30	230,0317	1,6156	1,603	-0,78
2	0,53	0,35	211,6603	1,6066		-0,22

Продолжение таблицы 3.2

3	0,37	0,40	198,0472	1,5944		0,54
4	0,21	0,53	168,1572	1,5207		5,13
5	0,16	0,63	134,3392	1,1626		27,47
6	0,11	13,23	30,32187	1,2398		22,66

Результаты исследований для СПБ с другими размерами ячеек представлены в приложении Л.

По данным таблицы 3.2 и данным приложения Л построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и отклонения К от $К_{теор}$ в зависимости от количества опор на контуре (рисунки 3.7…3.8).

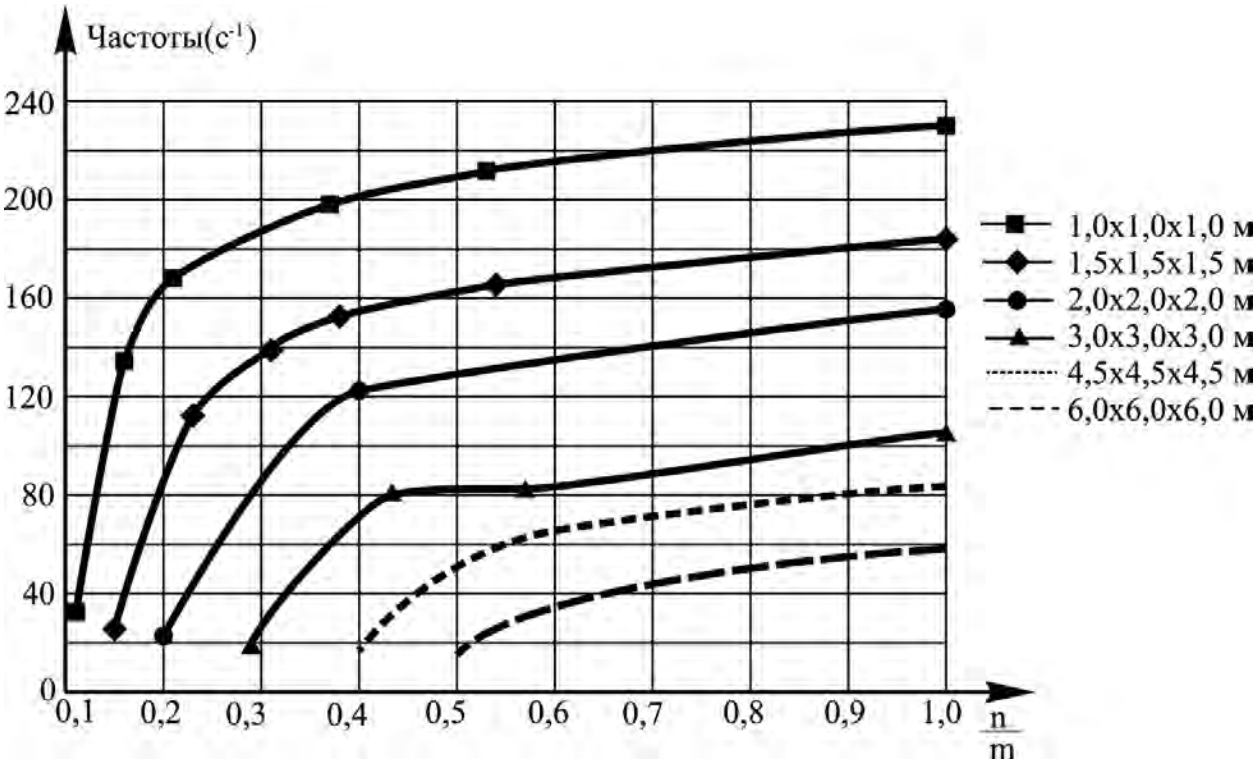


Рисунок 3.7– Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

Анализ результатов исследований частот собственных колебаний и прогибов показывает, что резкий скачок значений прогибов и частот колебаний происходит в тех случаях, когда опоры остаются только по углам конструкции (2 опоры по одной стороне). В случае, когда по одной стороне находится 3 и более опор, в системах перекрёстных балок динамические и жесткостные параметры практически не изменяются по сравнению с опиранием по всем контурным узлам.

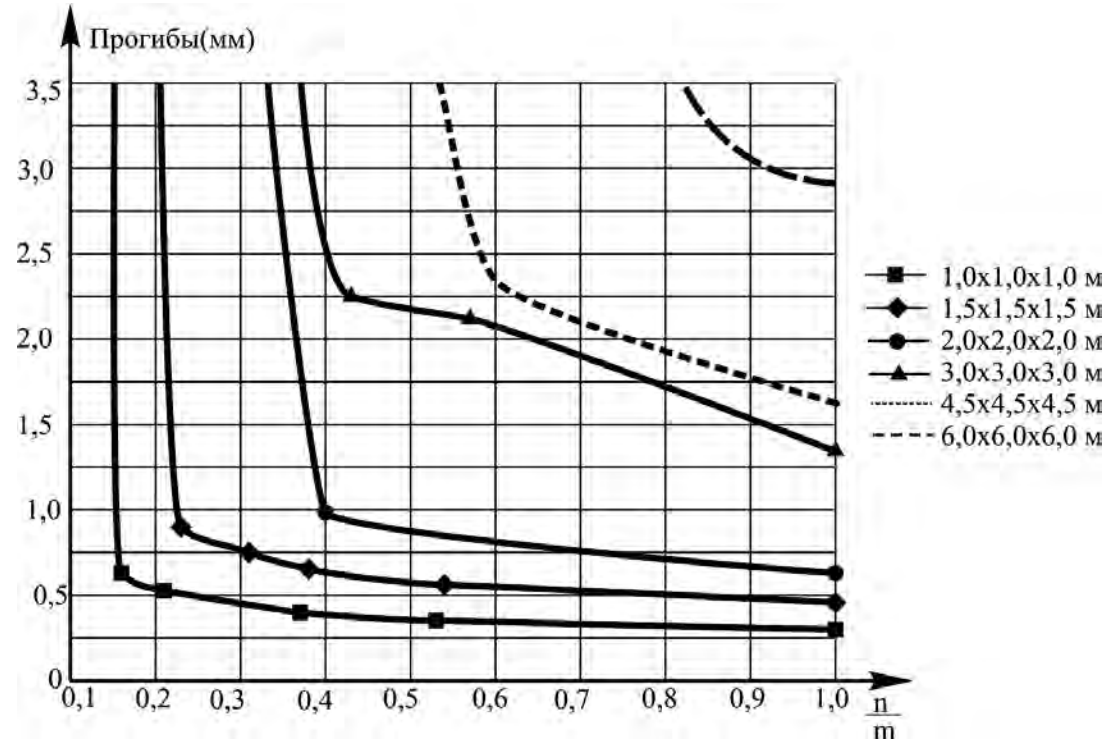


Рисунок 3.8 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

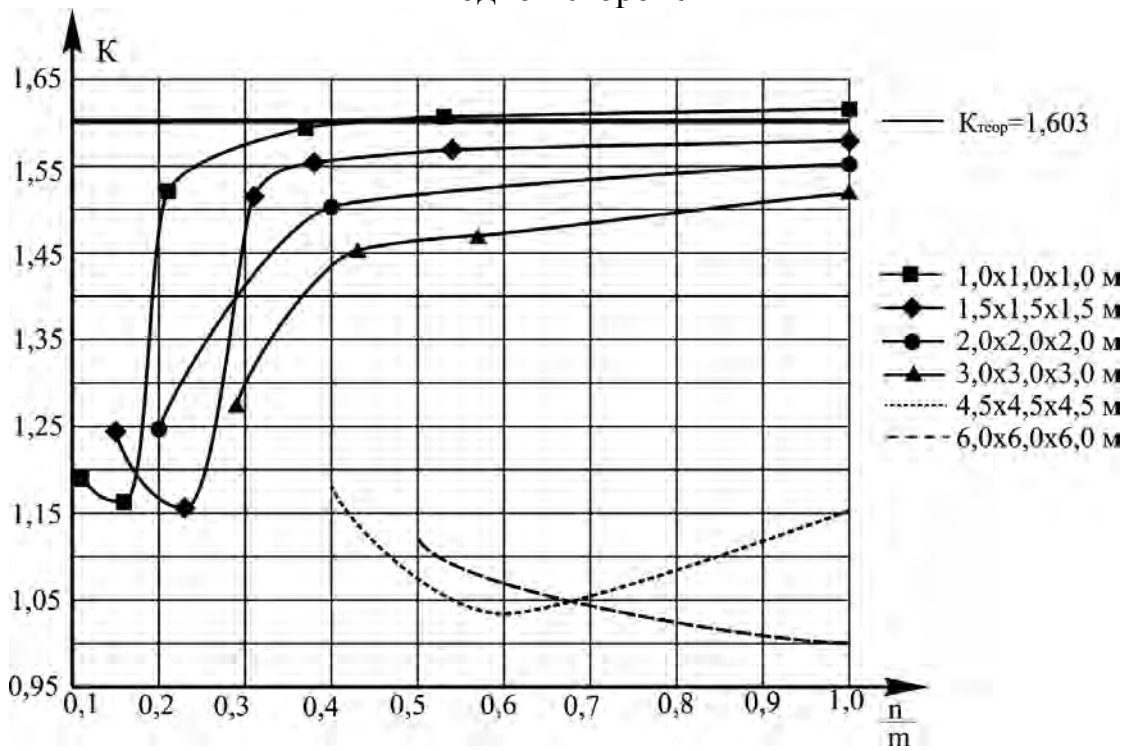


Рисунок 3.9 – Изменение К в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

В результате численных исследований можно сделать вывод, что при соотношении n/m >0,4 (где n – количество опор по одной стороне конструк-

ции; m – количество контурных узлов по одной стороне) и a/l < 0,17 коэффициент К с точностью до 9,34% соответствует теоретическому значению для треугольных изотропных пластин постоянной толщины. При бóльших соотношениях n/m и a/l функциональная зависимость (3.1) даёт существенную погрешность: отклонение коэффициента К от теоретического при 0,17<a/l ≤0,25 и n/m >0,6 составляет до 28,10%, при 0,25<a/l ≤0,33 и n/m >0,5 до 37,62%, при меньших значениях n/m для соответствующих a/l отклонение составляет до 35,33%.

3.3 Исследования систем перекрёстных балок на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу в зависимости от жёсткости узловых связей СПБ и размера ячеек

Проведены исследования системы перекрёстных балок на треугольном плане с целью выявления взаимосвязи прогибов и частот свободных колебаний конструкции при изменяемом размере ячеек и изменяемой податливостью узловых связей при установке по верхнему поясу элементов покрытия, которые включаются в работу конструкции.

В качестве расчетной была принята конструкция системы перекрёстных балок, аналогичная приведённой в разделе 3.1, включая интенсивность статической нагрузки и схему приложения сосредоточенных масс для динамического расчёта.

Нейтральная ось в элементах системы проходит по центру сечения балок (b × h = 160 × 1221 мм), элементы покрытия в свою очередь опираются на систему сверху. Таким образом, расстояние между нейтральной осью сечения и элементами покрытия составляет половину высоты балки (h/2 = 610,5 мм). Это обстоятельство учитывается при задании расчётной схемы системы в программном комплексе SCAD следующим образом (рисунок 3.10): элементы системы перекрёстных балок были разбиты на конечные элементы длиной по 0,5м. Эксцентриситет между нейтральной осью элементов СПБ и срединной поверхностью пластинчатых конечных элементов покрытия моделировался вертикальными стрежнями высотой h/2 = 610,5 мм. На первом этапе считаем, что податливость связей, крепящих элементы покрытия к СПБ, отсутствует, тогда вертикальные элементы моделируем стержневыми

конечными элементами очень большой жёсткости ($EI_x = 10^{10}$ Кн·м^2; $EI_y = 10^{10}$ Кн·м^2; $GI_{кр} = 10^{10}$ Кн·м^2; EA = $1{,}9536 \cdot 10^6$ Кн. Элементы покрытия размером на ячейку моделировались изотропными пластинами с разбивкой на конечные элементы размером 500 × 500× 500 мм. Цилиндрическая жёсткость пластин на первом этапе исследований принята постоянной D = 20 Кн·м.

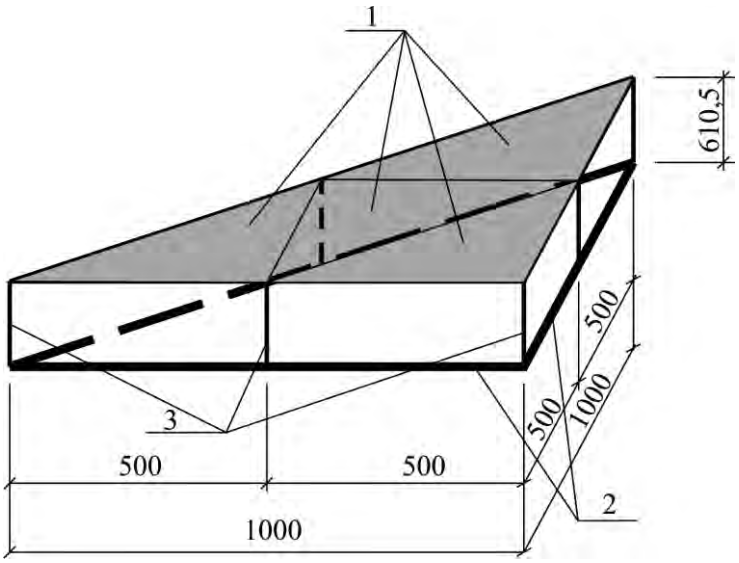


Рисунок 3.10 – Фрагмент расчётного элемента для системы с размером ячеек 1×1×1м: 1 – пластина размером на ячейку; 2 – конечный элемент системы перекрёстных балок; 3 – вертикальные конечные элементы

На первом этапе исследований предполагается, что элементы покрытия соединяются с элементами СПБ неподатливо. Результаты исследований конструкции размером в плане 18×18×18 м при включении в работу элементов покрытия с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м и различной податливостью узловых соединений СПБ представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1×1×1 м с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение Δ (%)
1	0,0001	0,38	201,1493	1,5869	1,603	1,01
2	0,001	0,35	210,5627	1,5889		0,88
3	0,005	0,27	241,123	1,5947		0,52
4	0,008	0,24	256,8916	1,5974		0,35
5	0,01	0,22	265,3281	1,5989		0,26
6	0,03	0,16	309,4863	1,6066		-0,22
7	0,05	0,15	327,2436	1,6098		-0,42
8	0,1	0,13	345,2244	1,6131		-0,63
9	0,2	0,12	356,4498	1,6152		-0,76

Продолжение таблицы 3.3

10	0,3	0,12	360,6238	1,6160		-0,81
11	0,5	0,12	364,1423	1,6166		-0,85
12	0,6	0,12	365,0485	1,6168		-0,86
13	0,8	0,12	366,1968	1,6170		-0,88
14	1	0,12	366,8942	1,6172		-0,88

Результаты исследований СПБ на треугольном плане при других размерах ячеек представлены в приложении М.

По данным таблицы 3.3 и данным приложения М построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и К (рисунки 3.11…3.13) в зависимости от размеров ячейки и величины податливости узловых связей СПБ.

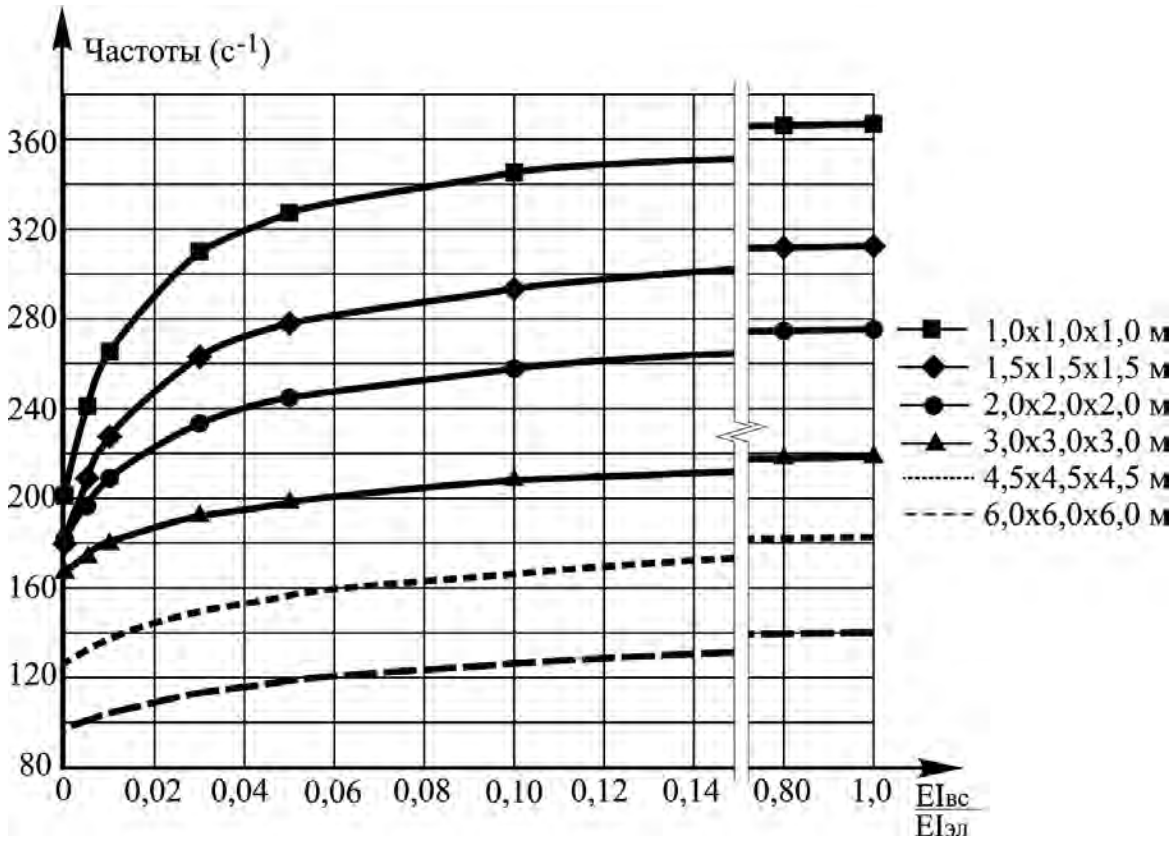


Рисунок 3.11 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек с покрытием сверху

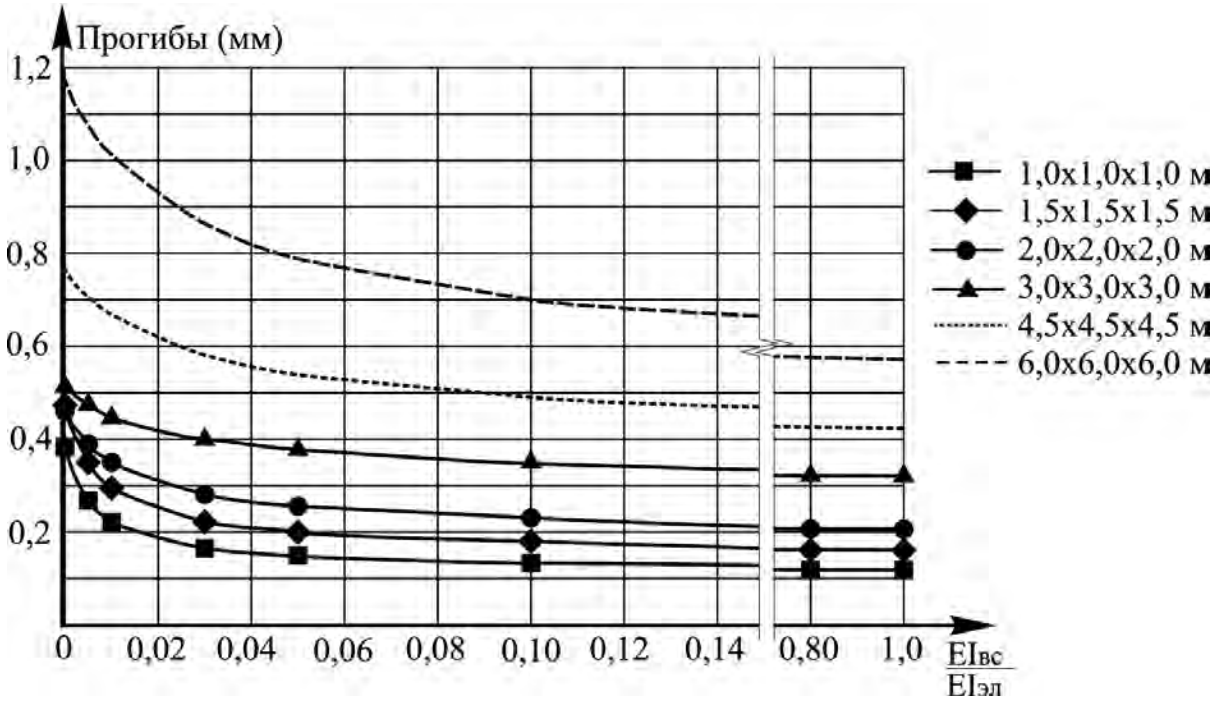


Рисунок 3.12 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек с покрытием сверху

Результаты исследований изменения частот собственных колебаний и прогибов (рисунки 3.11 и 3.12) показывают, что их наиболее интенсивное изменение происходит в диапазоне соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{эл}$ от 0 до 0,10. При больших соотношениях жёсткостей вставки и элемента влияние податливости узловых соединений практически не сказывается на динамических и жёсткостных параметрах системы перекрёстных балок на треугольном плане.

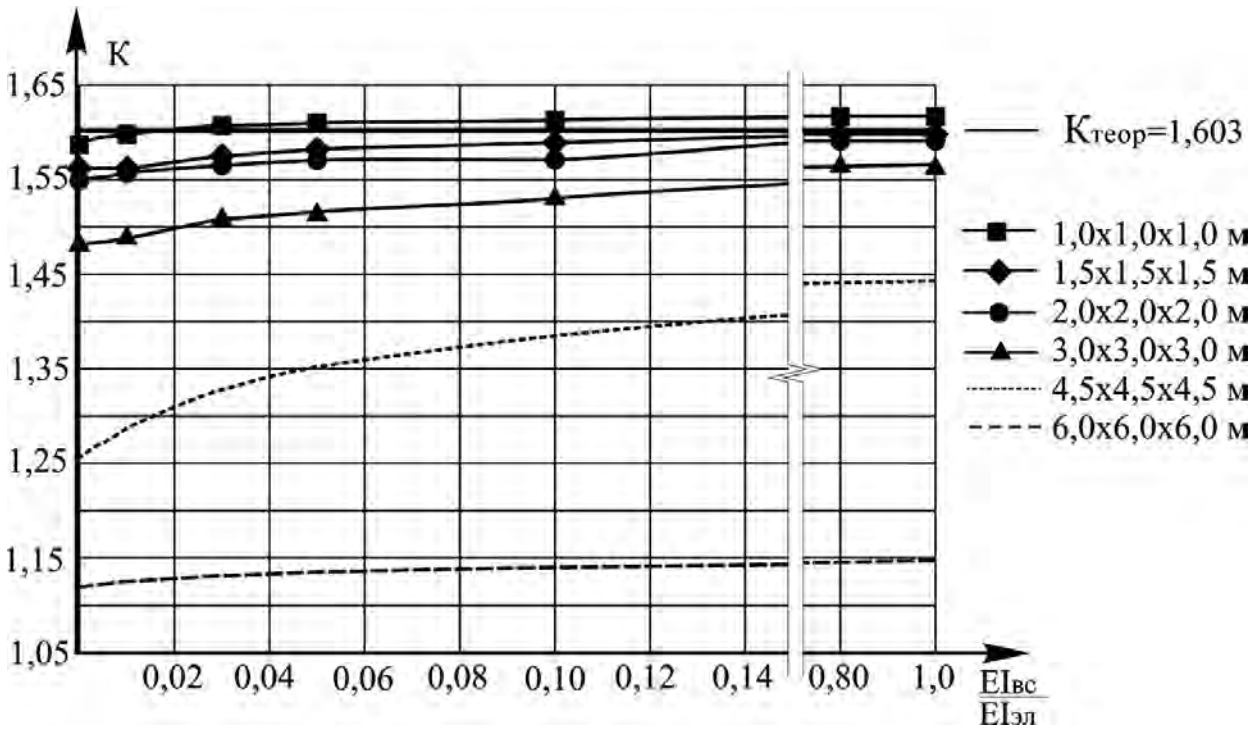


Рисунок 3.13 – Изменение К в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек с покрытием сверху

Анализ данных показывает, что с уменьшением размера ячейки система перекрёстных балок приближается в своей работе к пластинам, и, как следствие, коэффициент К стремится к значению $К_{теор.}$ для треугольных пластин. При минимальном размере ячейки коэффициент К практически совпадает с теоретическим значением, с увеличением размера ячейки отклонение расчётного коэффициента К от теоретического возрастает. Максимальное отклонение коэффициента К от теоретического при размере ячеек 1,0×1,0 м составило 1,01%, 1,5×1,5 м – 2,55%; 2,0×2,0м – 3,31%; 3,0×3,0м – 7,62%; 4,5×4,5 – 21,67%; 6,0×6,0м – 30,17%.

3.4 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу в зависимости от схемы опирания

Проведены исследования с целью выявления взаимосвязи максимальных прогибов и частот свободных колебаний системы перекрёстных балок, с покрытием на треугольном плане при изменяемом размере ячеек с постоянной податливостью узловых соединений конструкции при изменении схемы

опирания (количества опор).

Для исследований была принята постоянная податливость узловых соединений; соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента было принято $EI_{вс}/EI_{эл}$=0,03. Результаты исследования СПБ с покрытием, размером в плане 18×18×18 м с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м и различной схемой опирания представлены в таблице 3.4. Принятые в таблицах обозначения: n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов СПБ по одной стороне.

Таблица 3.4 – Результаты численных исследований СПБ с покрытием размером в плане с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение Δ (%)
1	1	0,16	309,4863	1,6066	1,603	-0,22
2	0,53	0,20	283,0884	1,5975		0,35
3	0,37	0,22	265,1823	1,5898		0,82
4	0,21	0,29	225,0666	1,5123		5,66
5	0,16	0,34	184,4291	1,1945		25,48
6	0,11	6,96	41,38214	1,2144		24,24

Результаты исследований для СПБ с другими размерами ячеек представлены в приложении Н.

По данным таблицы 3.4 и данным приложения Н построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и К в зависимости от количества опор на контуре (рисунки 3.14…3.16).

Анализ результатов исследований показывает, что резкое изменение частот и прогибов происходит в тех случаях, когда опоры остаются только по углам конструкции (2 опоры по одной стороне). В случае, когда по одной стороне находится 3 и более опор, в системах перекрёстных балок динамические и жесткостные параметры практически не изменяются по сравнению с опиранием по всем контурным узлам. Графики ведут себя аналогично графикам без покрытия.

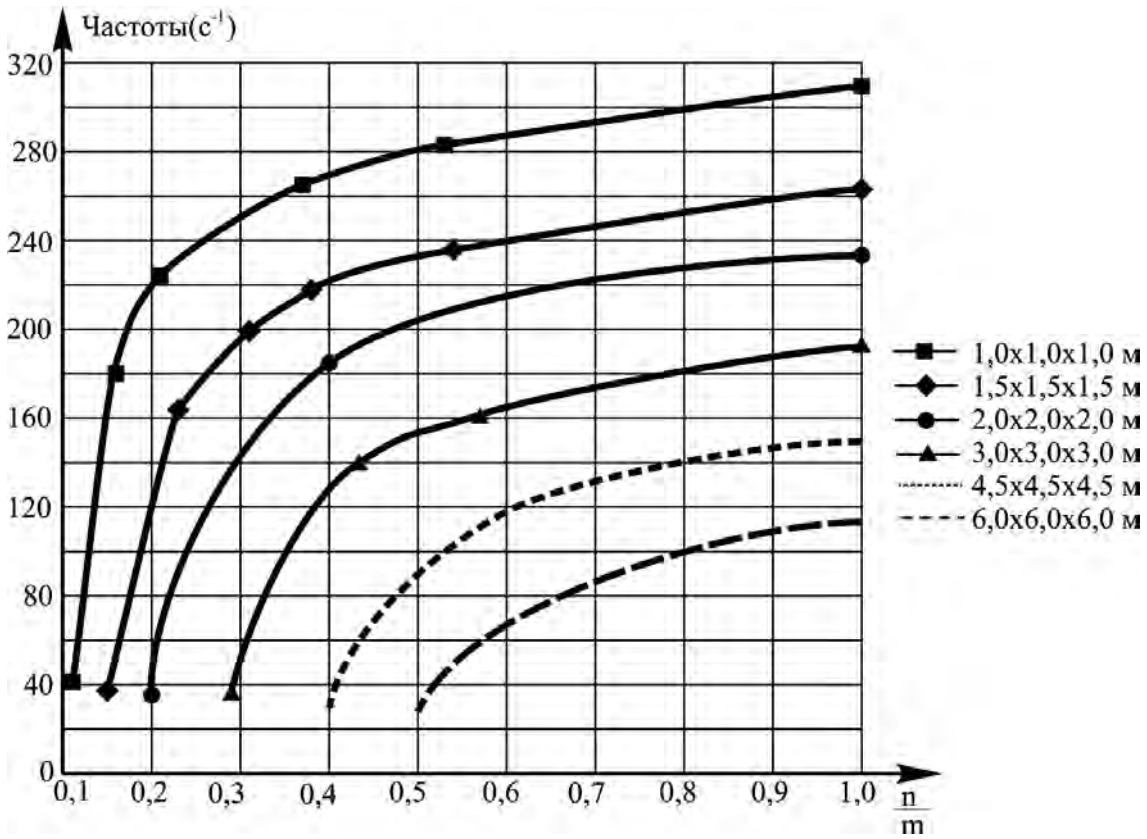


Рисунок 3.14– Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне с покрытием сверху

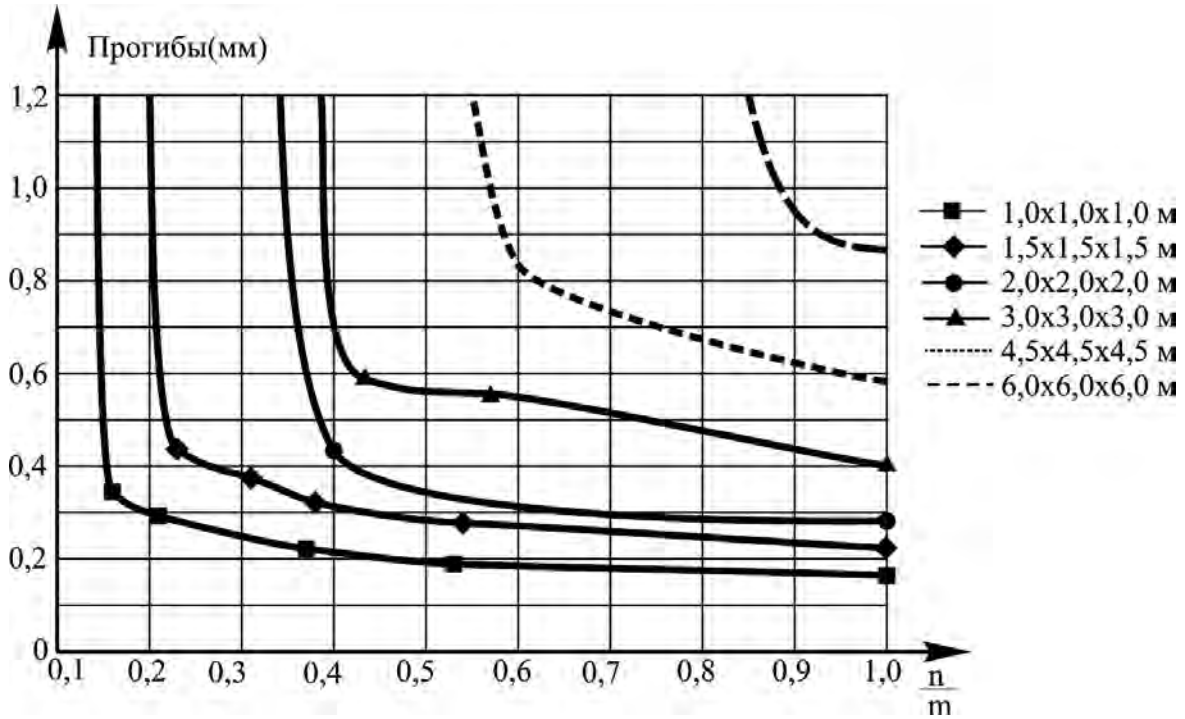


Рисунок 3.15 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне с покрытием сверху

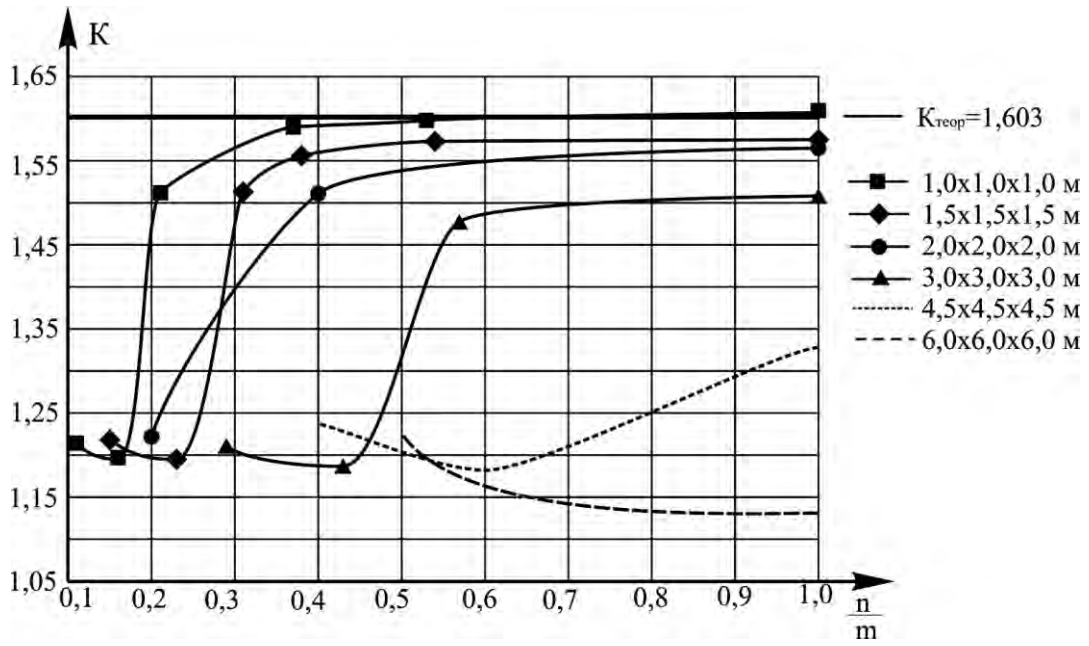


Рисунок 3.16 – Изменение К в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне с покрытием сверху

В результате численных исследований можно сделать вывод, что при соотношении n/m >0,4 (где n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов по одной стороне) и a/l < 0,17 коэффициент К с точностью до 7,77% соответствует теоретическому значению для треугольных изотропных пластин постоянной толщины. При бóльших соотношениях n/m и a/l функциональная зависимость (3.1) даёт существенную погрешность: отклонение коэффициент К от теоретического при 0,17<a/l ≤0,25 и n/m >0,6 составляет до 26,26%, при 0,25<a/l ≤0,33 и n/m >0,5 до 29,43%, при меньших значениях n/m для соответствующих a/l отклонение составляет до 25,97%.

По сравнению с результатами СПБ на треугольном плане без покрытия, максимальный процент отклонения К от $К_{теор}$ снизился при размере ячеек 1,0×1,0 м на 1,99%, 1,5×1,5 м – 2,49%; 2,0×2,0м – -1,52%; 3,0×3,0м – -3,82%; 4,5×4,5 – 9,08%; 6,0×6,0м – 8,18%. Максимальная частота увеличилась при размере ячеек 1,0×1,0 м на 25,67%, 1,5×1,5 м – 30,04%; 2,0×2,0м – 33,40%; 3,0×3,0м – 45,17%; 4,5×4,5 – 44,16%; 6,0×6,0м – 48,72%. Максимальные прогибы уменьшились при размере ячеек 1,0×1,0 м на 47,41%, 1,5×1,5 м – 53,91%; 2,0×2,0м – 59,08%; 3,0×3,0м – 74,17%; 4,5×4,5 –68,01%; 6,0×6,0м – 68,16%.

3.5 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу в зависимости от податливости связей, крепящих элементы покрытия к элементам системы перекрёстных балок

На данном этапе исследований рассматривается влияние податливости крепления элементов покрытия к СПБ на динамические и статические характеристики конструкции. Жёсткость вертикальных элементов изменялась от 0 (в практических расчётах принято $EI_x = 10^{-4}$ Кн·м^2; $EI_y = 10^{-4}$ Кн·м^2; $GI_{кр} = 10^{-4}$ Кн·м^2, EA = $1{,}9536 \cdot 10^6$ Кн) до очень высокой жёсткости, соответствующей неподатливому креплению ($EI_x=10^{10}$ Кн·м^2; $EI_y=10^{10}$ Кн·м^2; $GI_{кр}=10^{10}$ Кн·м^2, EA = $1{,}9536 \cdot 10^6$ Кн). При жёсткости вертикальных элементов, равных 0, покрытие не включается в совместную работу с системой перекрёстных балок, а при очень большой жёсткости вертикальных элементов податливость связей, крепящих элементы покрытия к СПБ, отсутствует. Соотношение жёсткости вставки к жёсткости элемента самой системы перекрёстных балок принято постоянным $EI_{вс}/EI_{эл}=0{,}03$.

В результате исследований определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок. Результаты исследований конструкции размером в плане 18×18×18 м с покрытием по верхнему поясу системы с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м при изменении податливости крепления пластины к СПБ представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м, с покрытием сверху, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x; EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение Δ (%)
1	10^{10}	0,16	309,4863	1,6065	1,603	-0,22
2	10^7	0,16	309,3881	1,6065		-0,22
3	10^5	0,17	302,153	1,6030		0,00
4	10^4	0,20	279,4449	1,5946		0,52
5	$6 \cdot 10^3$	0,21	272,2592	1,5946		0,52
6	$3 \cdot 10^3$	0,23	262,3704	1,5966		0,40
7	10^3	0,25	249,0317	1,6018		0,08

Продолжение таблицы 3.5

8	$5\cdot10^{2}$	0,27	243,1474	1,6045		-0,10
9	10^{2}	0,28	235,3177	1,6087		-0,35
10	10	0,30	230,5355	1,6122		-0,57
11	10^{-1}	0,30	229,459	1,6134		-0,65
12	10^{-4}	0,30	229,4466	1,6134		-0,65

Результаты исследований СПБ при других размерах ячеек приведены в приложении П.

По данным таблицы 3.5 и данным приложения П построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и $К_{расч}$ (рисунки 3.17…3.19) в зависимости от размеров ячейки и величины податливости связей, крепящих элементы покрытия к элементам системы перекрёстных балок. По оси абсцисс введена логарифмическая шкала.

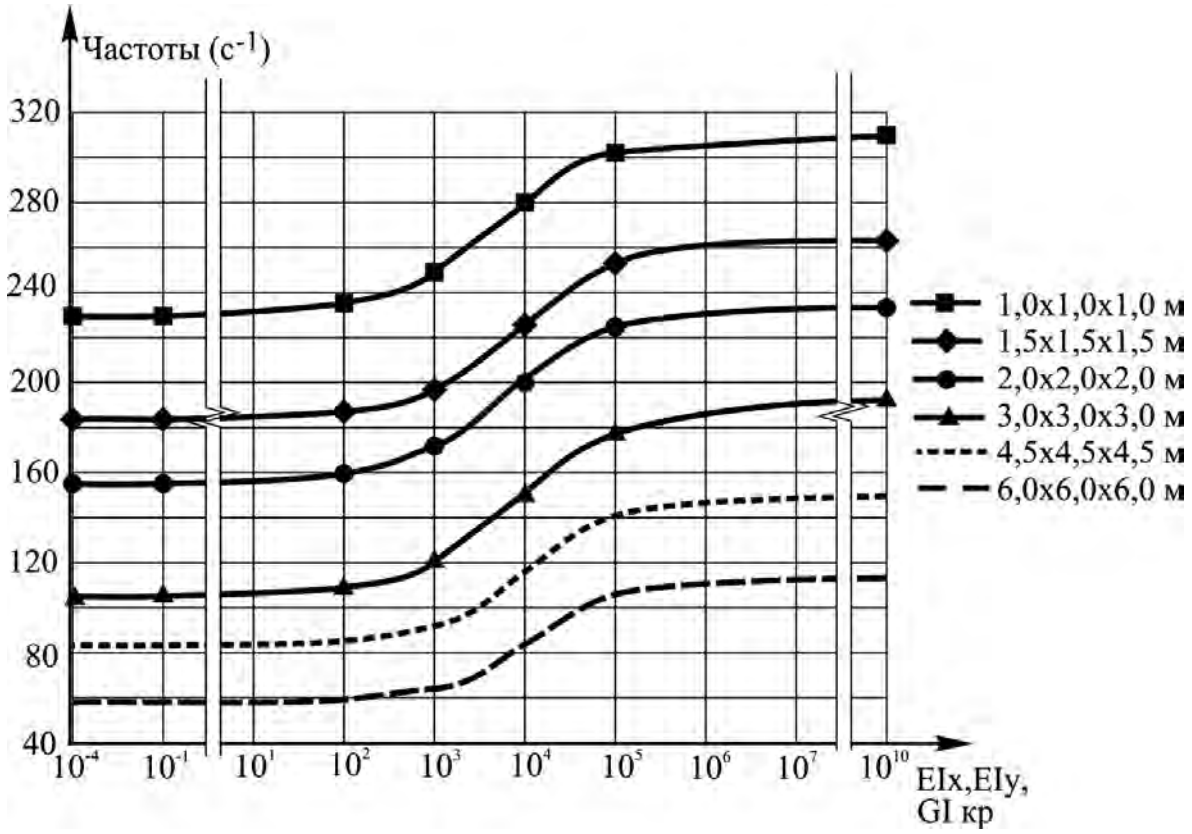


Рисунок 3.17 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от податливости крепления покрытия к системе при различных размерах ячеек с покрытием сверху

Частоты колебаний изменяются достаточно плавно без резких скачков. Наиболее резкие изменения наблюдается в пределах от 10^3 до 10^5 EI_x; EI_y; $GI_{кр.}$

Анализ результатов исследований изменения частот собственных колебаний (рисунок 3.17) показывает, что с уменьшением жёсткости вертикальных элементов частоты уменьшаются, и при наименьшей жёсткости (покрытие выключается из совместной работы с СПБ) частоты совпадают со значениями частот системы перекрёстных балок без включения в работу покрытия.

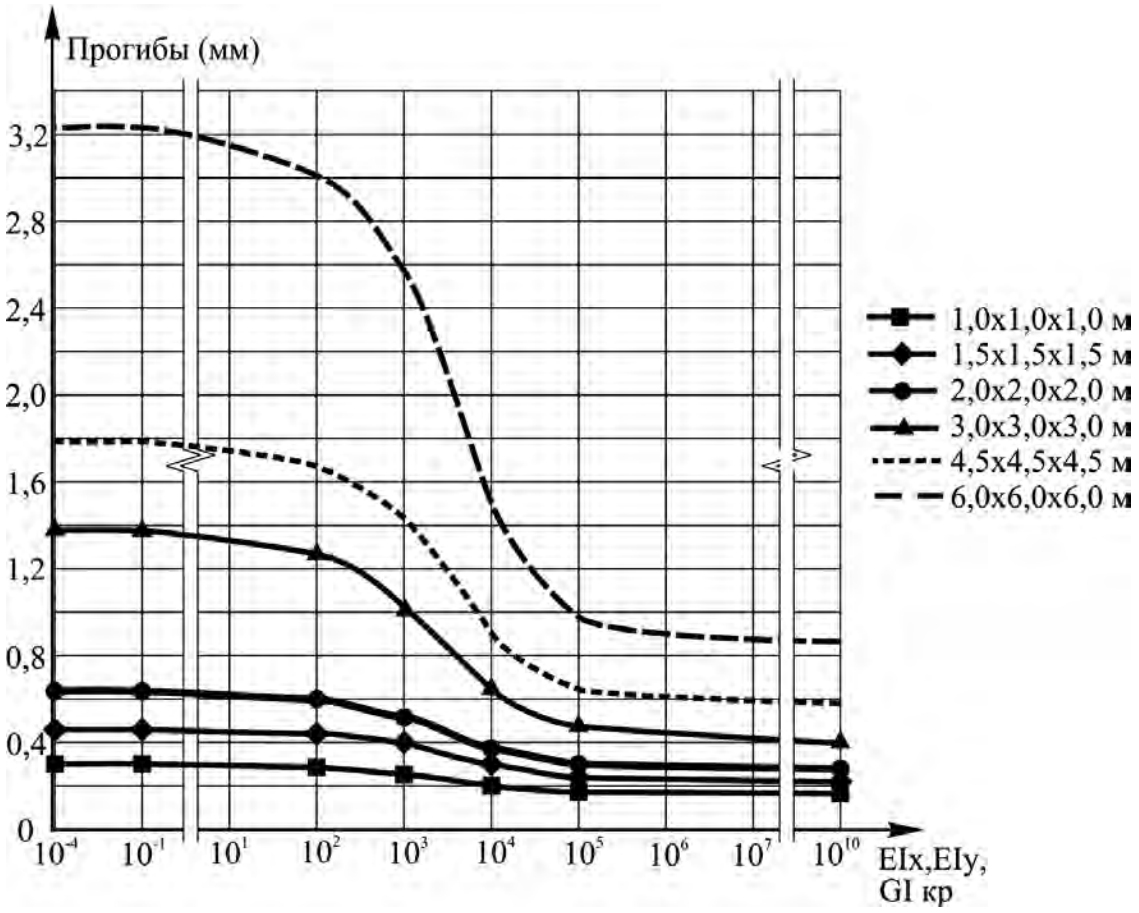


Рисунок 3.18 – Изменение прогибов в зависимости от податливости крепления покрытия к системе при различных размерах ячеек с покрытием сверху

Наиболее интенсивное изменение прогибов конструкции наблюдается в пределах от 10^1 до 10^5 EI_x, EI_y, $GI_{кр}$, при этом достаточно медленно снижаются при дальнейшем увеличении жёсткости вертикальных элементов.

Так же, как в случае с частотами колебаний, с уменьшением жёсткости вертикальных элементов при наименьшей жёсткости (выключение из работы элементов покрытия) прогибы (рисунок 3.18) совпадают со значениями прогибов для системы перекрёстных балок на треугольном плане без покрытия.

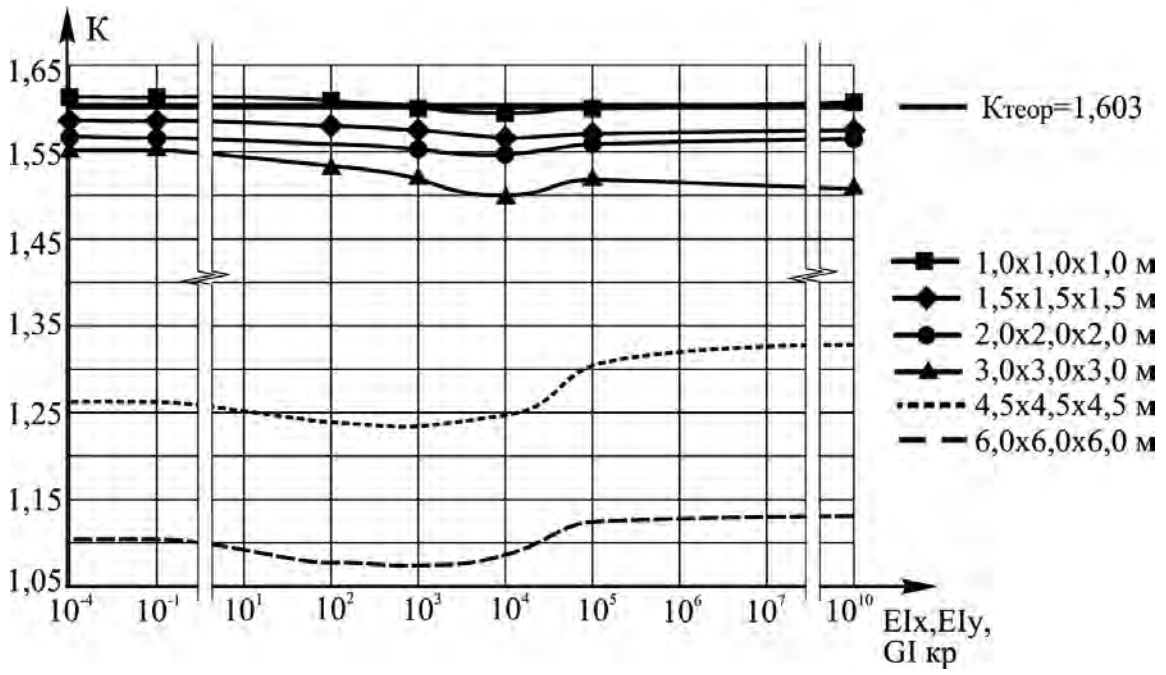


Рисунок 3.19 – Изменение К в зависимости от податливости крепления покрытия к системе при различных размерах ячеек с покрытием сверху

Для систем с размерами ячеек 1,0×1,0 м максимальное отклонение коэффициента К от теоретического значения составило -0,52%, минимальное – 0,0%; для ячеек 1,5×1,5 м max – 2,28% min – 1,07%; для ячеек 2,0×2,0 м max – 3,53% min – 2,28%; для ячеек 3,0×3,0 м max – 6,37% min – 3,17%; для ячеек 4,5×4,5 м max – 23,03% min – 17,17%; для ячеек 6,0×6,0 м max – 32,99% min – 29,43%.

3.6 Результаты исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу в зависимости от жёсткости покрытия и размера ячеек

В данном разделе исследуется зависимость влияния жёсткости элементов покрытия на статические и динамические параметры системы перекрёстных балок на треугольном плане. В качестве изменяемого параметра принята цилиндрическая жёсткость пластинки, моделирующая элементы покрытия, при этом цилиндрическая жёсткость покрытия изменялась от 0,3125 Кн·м до 540 Кн·м. Соотношение жёсткости вставки к жёсткости элемента в СПБ принято постоянным $EI_{вс}/EI_{Эл}$ = 0,03. Принято, что элементы покрытия жёстко связаны с системой перекрёстных балок ($EI_x=10^{10}$ Кн·м^2; $EI_y=10^{10}$ Кн·м^2; $GI_{кр}=10^{10}$ Кн·м^2, EA = $1{,}9536\cdot10^6$ Кн).

В результате исследований определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок на треугольном плане. Результаты исследований конструкции размером в плане 18×18×18 м с покрытием по верхнему поясу системы с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м при изменении жёсткости покрытия представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1,0×1,0×1,0 м с покрытием по верху при изменении жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение Δ (%)
1	0,3125	0,24	255,5328	1,6110	1,603	-0,50
2	2,5000	0,21	276,6623	1,6092		-0,39
3	8,4375	0,18	294,347	1,6078		-0,30
4	20,0000	0,16	309,4863	1,6066		-0,22
5	39,0625	0,15	322,6628	1,6056		-0,16
6	67,5000	0,14	334,2794	1,6048		-0,11
7	107,1875	0,13	344,6285	1,6041		-0,07
8	160,0000	0,13	353,9294	1,6036		-0,04
9	227,8125	0,12	362,3516	1,6032		-0,01
10	312,5000	0,11	370,0287	1,6029		0,01
11	415,9375	0,11	377,0679	1,6028		0,02
12	540,0000	0,11	383,5565	1,6027		0,02

Результаты исследований СПБ на треугольном плане при других размерах ячеек приведены в приложении Р.

По данным таблиц 3.5 и данным приложения Р построены графики изменения частот собственных колебаний, максимальных прогибов и К (рисунки 3.20…3.22) в зависимости от размеров ячейки и цилиндрической жёсткости покрытия.

Анализ результатов исследований, представленных на рисунках 3.20 и 3.21 показывает, что с увеличением цилиндрической жёсткости покрытия происходит увлечение частот свободных колебаний. Прогибы с увеличением цилиндрической жёсткости покрытия уменьшаются.

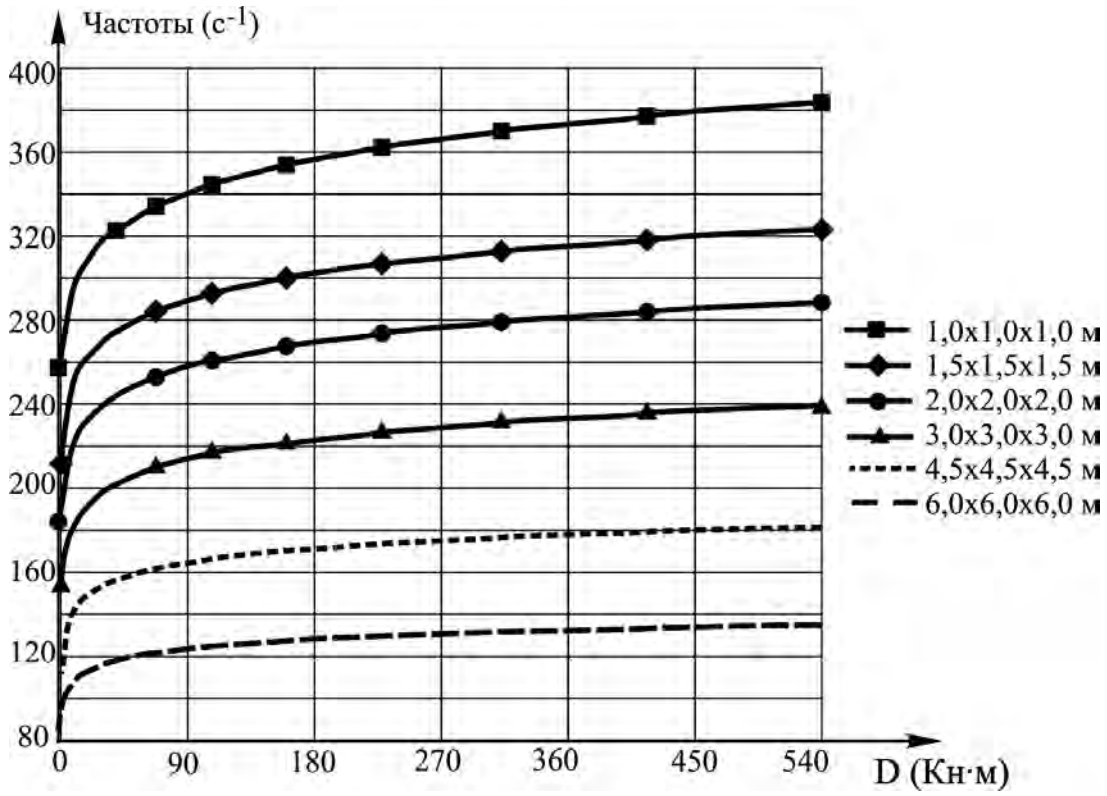


Рисунок 3.20 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от цилиндрической жёсткости покрытия при различных размерах ячеек

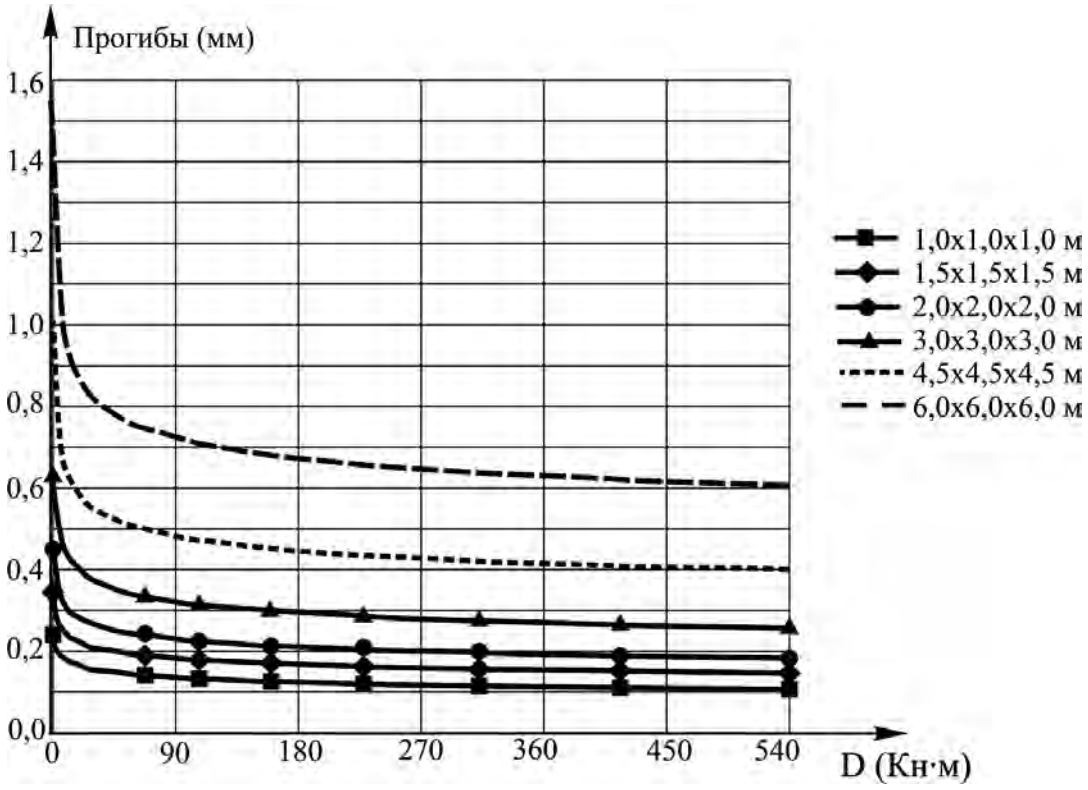


Рисунок 3.21 – Изменение прогибов в зависимости от цилиндрической жёсткости покрытия при различных размерах ячеек

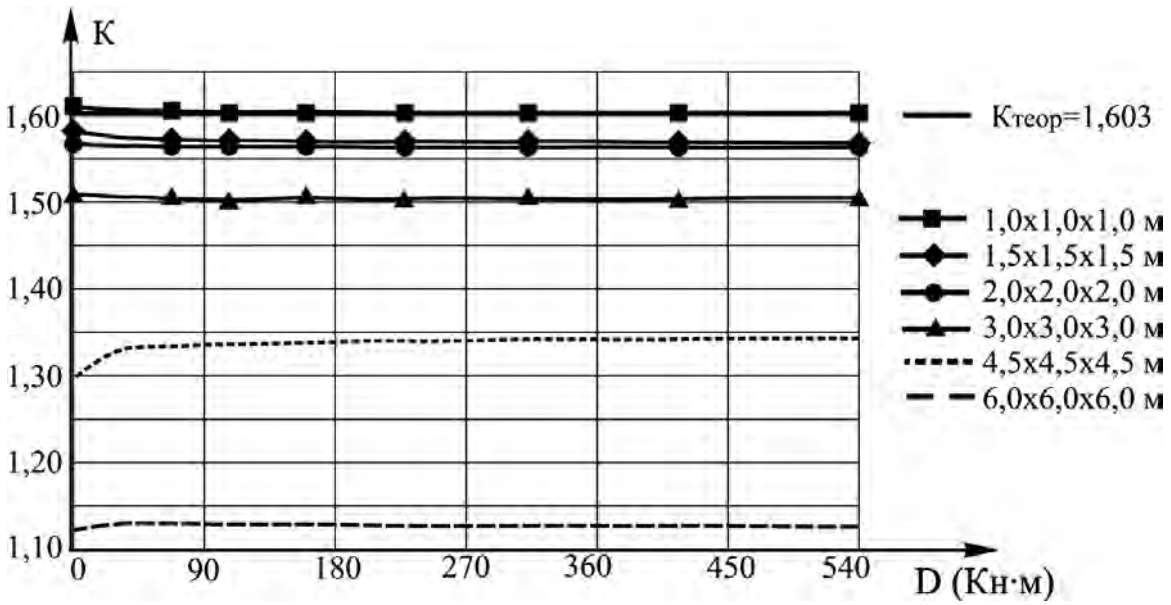


Рисунок 3.22 – Изменение К в зависимости от цилиндрической жёсткости покрытия при различных размерах ячеек

Анализ данных показывает, что изменение цилиндрической жёсткости покрытия, не сильно влияет на отклонения К от $К_{теор}$. Для систем с размерами ячеек 1,0×1,0 м максимальное отклонение коэффициента К от теоретического значения составило -0,50%, минимальное – 0,01%; для ячеек 1,5×1,5 м max – 2,16% min – 1,31%; для ячеек 2,0×2,0 м max – 2,48% min – 2,22%; для ячеек 3,0×3,0 м max – 6,19% min – 5,89%; для ячеек 4,5×4,5 м max – 19,16% min – 16,18%; для ячеек 6,0×6,0 м max – 29,98% min – 29,42%.

3.7 Сопоставление результатов исследований систем перекрёстных балок на треугольном плане без покрытия и с покрытием по верхнему поясу

Для сравнения приняты СПБ на треугольном плане с размерами ячеек от 1,0×1,0×1,0 м до 6,0×6,0×6,0 м. Сравнивались следующие параметры: максимальный прогиб, основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок, отклонения К от $К_{теор}$.

В таблицах 3.7…3.9 приведены исследованные параметры при соотношение жёсткости вставки к жёсткости элемента $EI_{вс}/EI_{Эл}$ = 0,03. Принято, что элементы покрытия жёстко связаны с системой перекрёстных балок ($EI_x=10^{10}$ Кн·м^2; $EI_y=10^{10}$ Кн·м^2; $GI_{кр}=10^{10}$ Кн·м^2, EA = $1{,}9536\cdot10^6$ Кн). Цилиндрическая

жёсткость покрытия принята постоянной D=20,0 Кн·м.

Таблица 3.7 – Сопоставление полученных прогибов СПБ на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу и без покрытия, для различных размеров ячеек

Размер ячейки (м)	СПБ без элементов покрытия	СПБ с элементами покрытия	Разница между прогибами
	W_0, (мм)	W_0, (мм)	Δ (%)
1,0×1,0	0,30	0,16	46,67
1,5×1,5	0,46	0,22	52,17
2,0×2,0	0,63	0,28	55,56
3,0×3,0	1,34	0,40	70,15
4,5×4,5	1,62	0,58	62,20
6,0×6,0	2,91	0,87	70,10

Таблица 3.8 – Сопоставление полученных частот свободных колебаний СПБ на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу и без покрытия, для различных размеров ячеек

Размер ячейки (м)	СПБ без элементов покрытия	СПБ с элементами покрытия	Разница между частотами
	ω, (1/с)	ω, (1/с)	Δ (%)
1,0×1,0	230,0317	309,4863	25,67
1,5×1,5	184,0196	263,0259	30,04
2,0×2,0	155,3792	233,3113	33,40
3,0×3,0	105,3156	192,0645	45,17
4,5×4,5	83,47709	149,495	44,16
6,0×6,0	58,05049	113,2067	48,72

Таблица 3.9 – Сопоставление коэффициента $К_{расч.}$ СПБ на треугольном плане с покрытием по верхнему поясу и без покрытия, для различных размеров ячеек

Размер ячейки (м)	СПБ без элементов покрытия	Отклонение К от $К_{теор}$	СПБ с элементами покрытия	Отклонение К от $К_{теор}$
	$К_{расч.}$	Δ (%)	$К_{расч.}$	Δ (%)
1,0×1,0	1,6155	-0,78	1,6066	-0,22
1,5×1,5	1,5794	1,47	1,5752	1,74
2,0×2,0	1,5522	3,17	1,5654	2,34
3,0×3,0	1,5179	5,31	1,5076	5,95
4,5×4,5	1,1526	28,10	1,3278	17,17
6,0×6,0	1,0000	37,62	1,1311	29,43

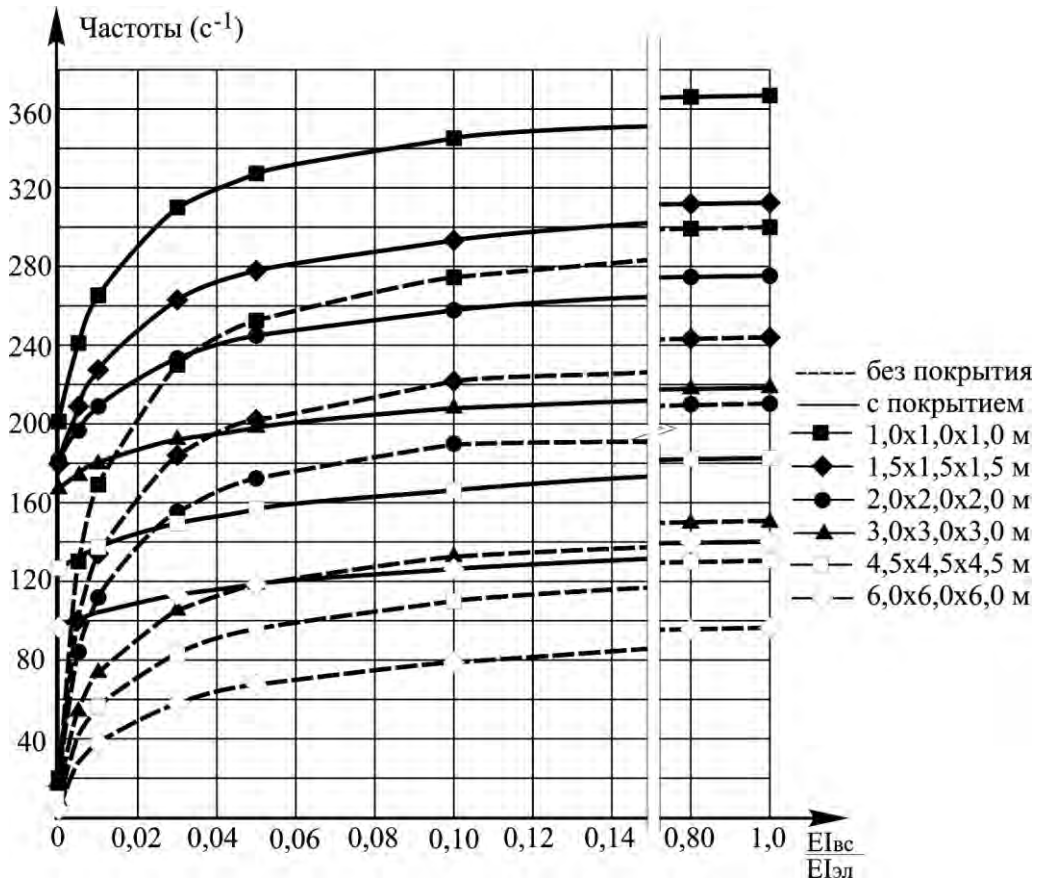


Рисунок 3.23 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

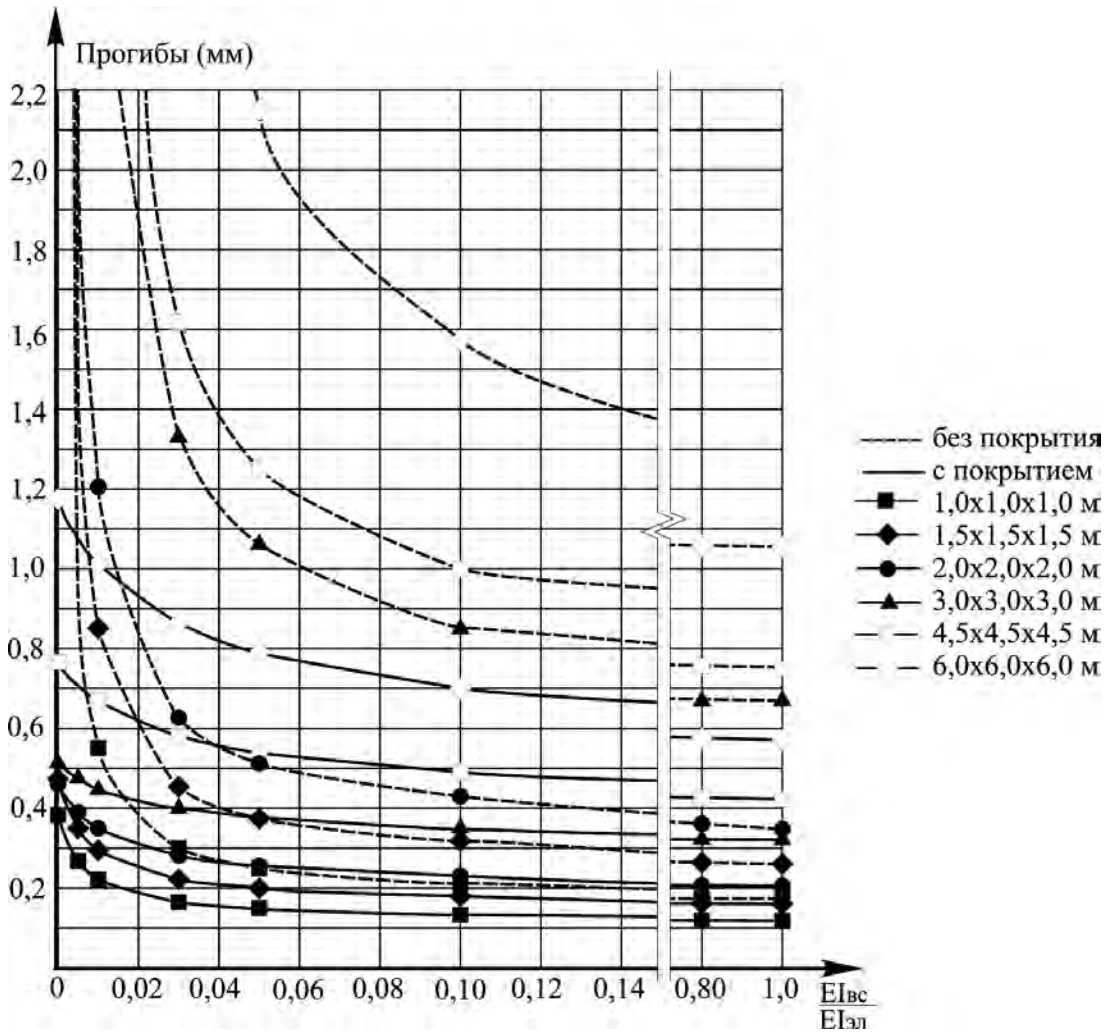


Рисунок 3.24 –Изменение прогибов в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

При включении в работу элементов покрытия по верхнему поясу системы перекрёстных балок на треугольном плане частоты свободных колебаний увеличиваются.

Прогибы с включением в работу СПБ на треугольном плане покрытия значительно уменьшаются.

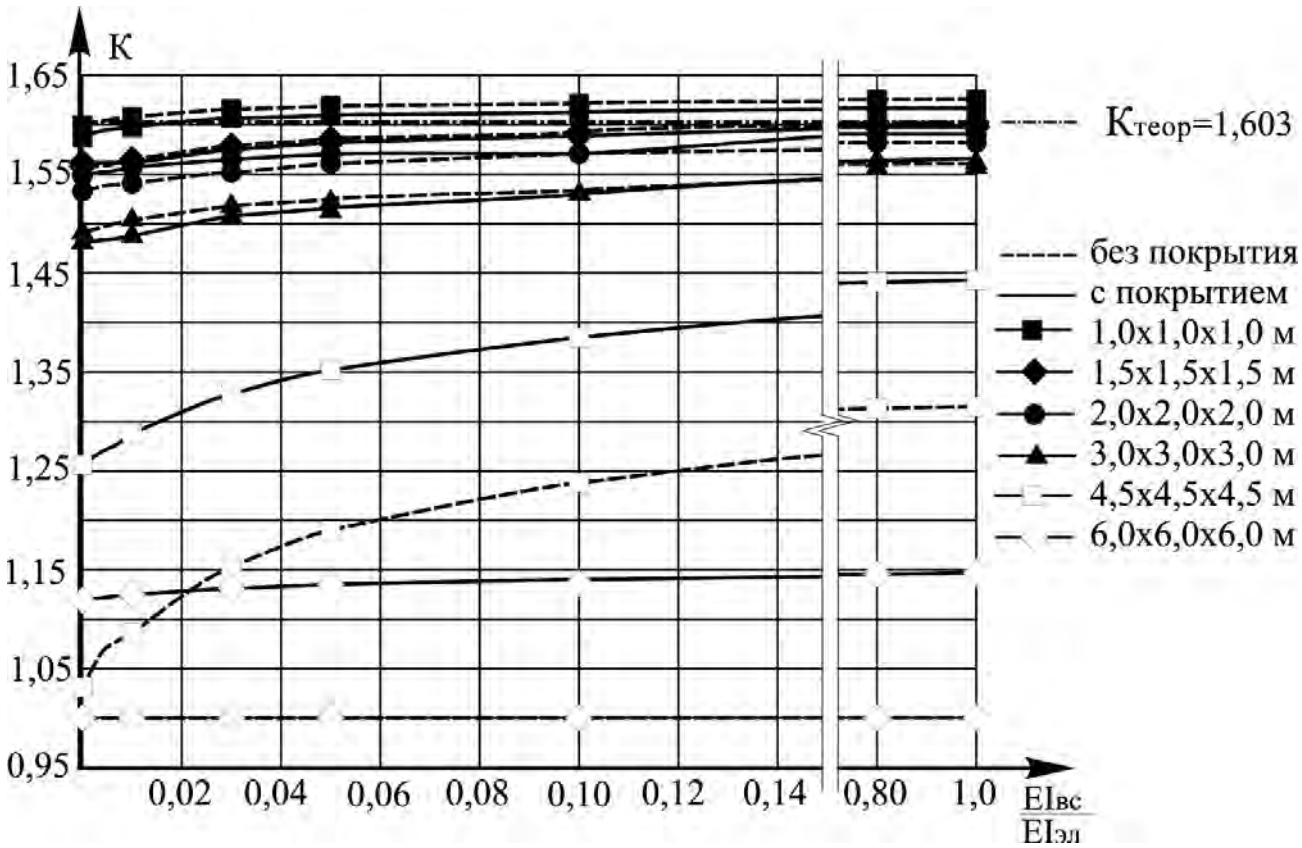


Рисунок 3.25 – Изменение К в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента с покрытием сверху и без него при различных размерах ячеек

Сопоставляя результаты исследований изменения К можно сделать вывод, что с включением в работу покрытия значение коэффициента К приближается к $К_{теор.}$ для всех размеров ячеек при различной податливости узловых соединений СПБ на треугольном плане.

3.8 Выводы по главе 3

1. Численными методами установлено, что интегральные физические характеристики систем перекрёстных балок на треугольном плане из клееной древесины (максимальный прогиб от действия равномерно распределённой нагрузки W_0 и основная частота колебаний в ненагруженном состоянии ω) связаны между собой функциональной зависимостью (3.1)

2. Для систем перекрёстных балок на треугольном плане с размерами ячеек $a/l < 0{,}17$ (a – размер ячейки, l – размер в плане системы перекрёстных балок) коэффициент К с точностью до 7,01% соответствует теоретическому

значению для треугольных изотропных пластин постоянной толщины независимо от соотношения жесткости вставки к жёсткости элемента. При бóльших соотношениях *a/l* функциональная зависимость (3.1) даёт существенную погрешность: отклонение коэффициента К от теоретического при 0,17<*a/l* ≤0,25 составляет до 35,67%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 до 37,62%.

3. При соотношении n/m >0,4 (где n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов по одной стороне) и *a/l* < 0,17 коэффициент К с точностью до 9,34% соответствует теоретическому значению для треугольных изотропных пластин постоянной толщины. При бóльших соотношениях n/m и *a/l* функциональная зависимость (3.1) даёт существенную погрешность: отклонение коэффициента К от теоретического при 0,17<*a/l* ≤0,25 и n/m >0,6 составляет до 28,10%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 и n/m >0,5 до 37,62%, при меньших значениях n/m для соответствующих *a/l* отклонение составляет до 35,33%.

4. При включении в работу СПБ на треугольном плане элементов покрытия в виде изотропных пластин жёсткость конструкции увеличивается, на что указывает увеличение частот собственных колебаний и снижением прогибов. Характер изменения прогибов, частот колебаний и коэффициента К аналогичен изменению этих параметров конструкции без элементов покрытия. В конструкциях с покрытием значение коэффициента К ближе к теоретическому, разница между значениями с покрытием и без составляет при *a/l* ≤0,17 0,84%, при 0,17<*a/l* ≤0,25 до 13,19%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 до 11,59%.

Податливость связей, крепящих элементы покрытия к системе перекрёстных балок на треугольном плане, существенно влияет на прогибы и частоты колебаний конструкции. С увеличение жёсткости связей жёсткость всей конструкции увеличивается. Отклонение коэффициента К от теоретического при *a/l* ≤0,17 составляет до 5,95%, 0,17<*a/l* ≤0,25 составляет до 23,02%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 до 32,97%.

С увеличением жёсткости элементов покрытия увеличивается жёсткость конструкции, а коэффициент К практически не изменяется. Отклонение коэффициента К от теоретического при *a/l* ≤0,17 составляет до 6,19%, 0,17<*a/l* ≤0,25 составляет до 19,16%, при 0,25<*a/l* ≤0,33 до 29,98%.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ПЕРЕКРЁСТНЫХ БАЛОК

4.1 Методика проведения экспериментальных исследований систем перекрёстных балок на квадратном плане

Целью экспериментальных исследований являлось изучение поведения систем перекрёстных балок с учётом податливости узловых соединений при статическом и динамическом нагружении. В ходе испытаний находился максимальный прогиб систем перекрёстных балок и основная частота собственных поперечных колебаний в ненагруженном состоянии. Данные, полученные в ходе эксперимента, необходимы для оценки и сопоставления их с результатами теоретического исследований.

Для решения поставленной цели экспериментальных исследований были сформулированы следующие задачи:

- разработка методики определения частот собственных поперечных колебаний и прогибов систем перекрёстных балок;
- разработка и сборка испытательного стенда;
- разработка и сборка опытных систем перекрёстных балок с разными размерами ячеек;
- определение фактического модуля упругости древесины элементов системы перекрёстных былок;
- проведение статических испытаний для определения максимальных прогибов систем перекрёстных балок;
- проведение динамических испытаний для определения собственных частот поперечных колебаний систем перекрёстных балок;
- анализ и сравнение данных, полученных в результате численных и экспериментальных исследований.

4.1.1 Схема экспериментального стенда

Статические и динамические испытания систем перекрёстных балок проводились на специально изготовленном стенде (рисунки 4.1…4.4).

Рисунок 4.1 –Испытательный стенд для экспериментальных исследований с установленной на него системой перекрёстных балок

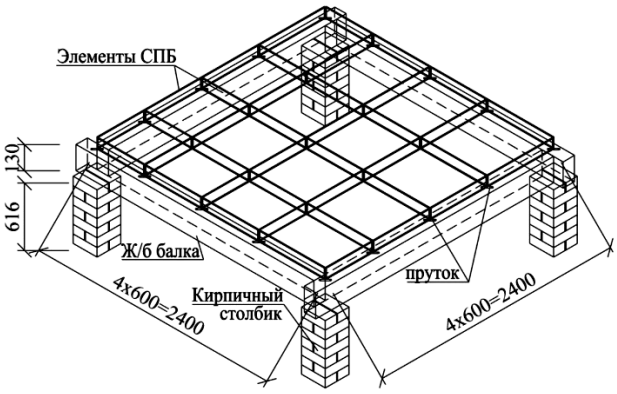


Рисунок 4.2 – Схема испытательного стенда

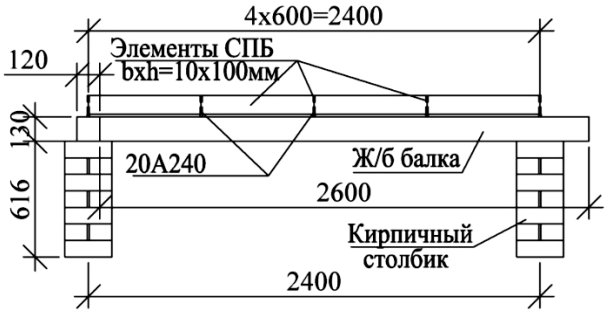


Рисунок 4.3 – Вид сбоку на испытательный стенд

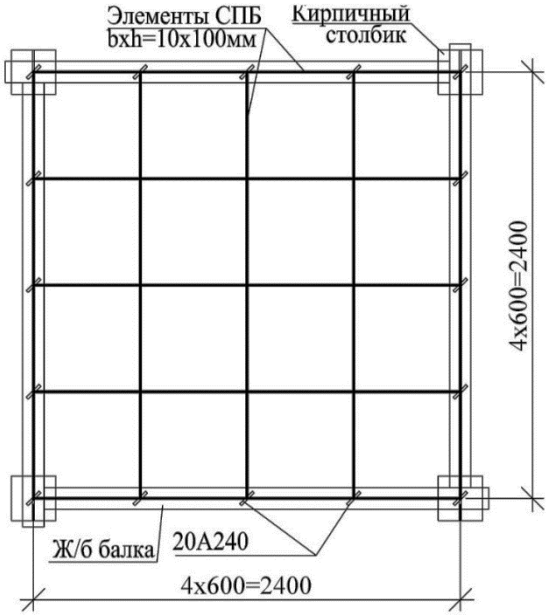


Рисунок 4.4 – Вид сверху на испытательный стенд

Испытательный стенд представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из вертикальных опор, сложенных из кирпича и установленных по углам конструкции. По опорам сверху уложены железобетонные балки сечением 120×130(h) мм, на которые СПБ опирается через стальные цилиндрические опоры диаметром 20 мм. Система перекрёстных балок выполнена из деревянных элементов постоянного сечения 10×100(h) мм длиной 590 мм (для испытаний конструкции с ячейками 600×600 мм) и 390 мм (для испытаний конструкции с ячейками 400×400 мм), сопряжённые сталь-

ными гнутыми уголками из листа толщиной 1 мм на болтах М6 в узлах (рисунок 4.5).

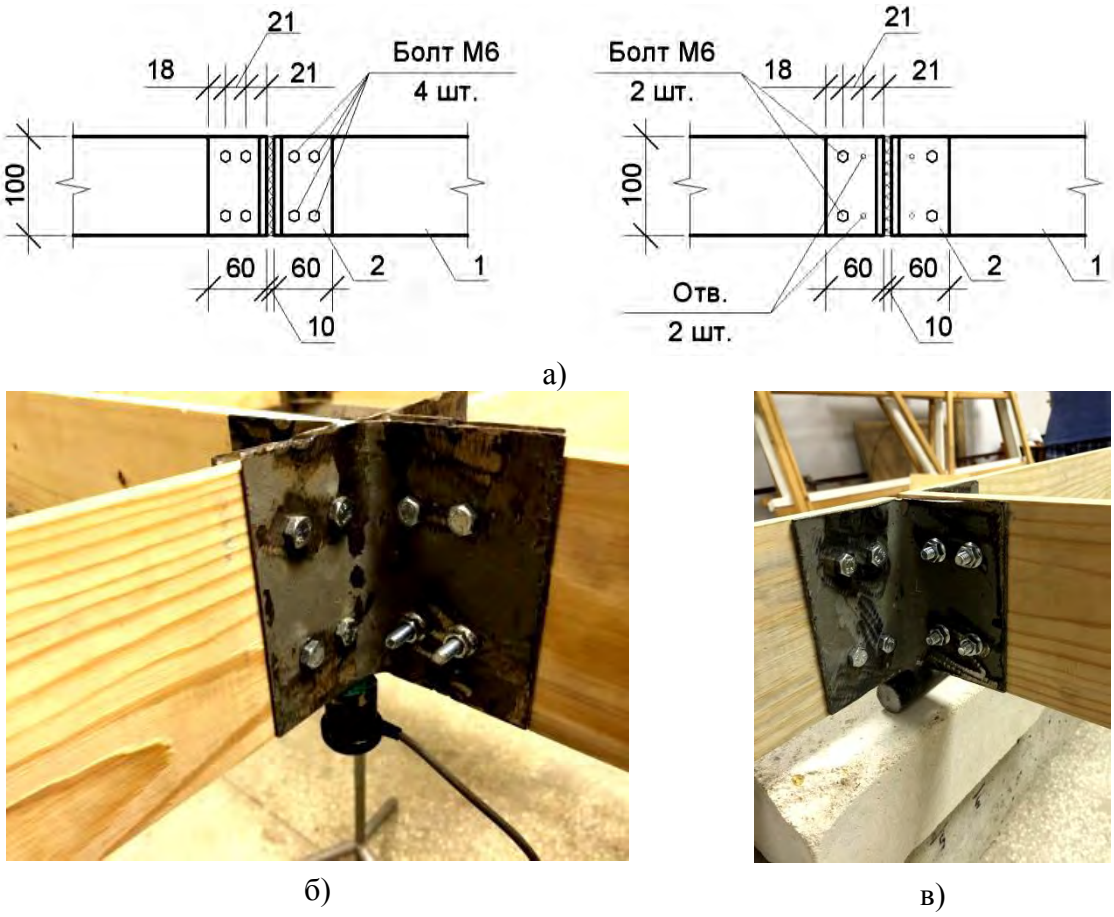


Рисунок 4.5 – Узлы системы перекрёстных балок
(а – схема рядовых узлов с 4 и 2 нагелями; б – рядовой узел; в – опорный узел с цилиндрической опорой)

4.1.2 Методика проведения статических испытаний

Для определения прогиба СПБ загружалась сосредоточенной нагрузкой во внутренние узлы системы. В качестве нагрузки использовались запаянные полиэтиленовые пакеты с песком (рисунок 4.6), вес каждого из которых составлял 10±0,05 Н. Загружение осуществлялось в пять ступеней для СПБ с размером ячейки 0,6×0,6 м, вес каждой ступени составлял 90 Н; таким образом вес каждой ступени составил 0,01563 кН/м^2, и в две ступени для СПБ с размером ячейки 0,4×0,4 м, вес каждой ступени составлял 250Н; таким образом вес каждой ступени составил 0,043403 кН/м^2. Для определения прогиба в центральном узле конструкции устанавливался индикатор часового типа ИЧ-25 с ценой деления 0,01 мм на штативе (рисунок 4.7).

После снятия показания по индикатору от максимальной нагрузки, которая составляла 0,078125 кН/м^2 для СПБ с размером ячейки 0,6×0,6 м и 0,086806 кН/м^2 для СПБ с размером ячейки 0,4×0,4 м , СПБ разгружалась, и после пятнадцати минут «отдыха» загружалась вновь. Для получения стабильных результатов экспериментальных прогибов нагружения проводились не менее трёх раз.

Податливость узловых соединений моделировалась количеством болтов в каждом узле. На 1-ом этапе в узлах было установлено по 4 болта на каждый элемент балки, примыкающий к узлу. На 2-ом этапе податливость узловых соединений увеличивалась путём выкручивания 50% болтов из каждого узла схемы.

Рисунок 4.6 – Приложение узловой нагрузки на конструкцию

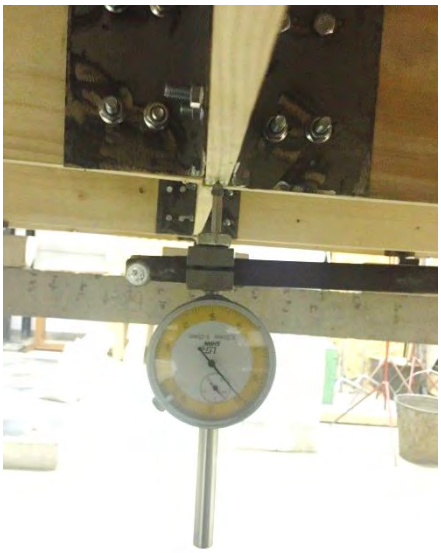


Рисунок 4.7 – Индикатор часового типа ИЧ-25

Схема опирания изменяется следующим образом. В первом случае под каждым контурным узлом расположены стальные цилиндрические опоры диаметром 20 мм для осуществления шарнирного опирания (рисунок 4.5). Затем с каждой стороны СПБ удаляются опоры через один узел, и в этом случае система опирается с каждой стороны в трех местах – в угловых узлах и в середине пролета. На последнем этапе удаляются все промежуточные опоры и СПБ опирается только по угловым узлам.

Включение в работу покрытия моделируется следующим образом. Сверху на систему укладываются 16 листов ДВП толщиной δ = 3,2 мм разме-

ром 0,6×0,6 м или 0,4×0,4 м на каждую ячейку. Крепление листов осуществляется гвоздями Ø 1 мм, *l*=15мм. Жесткость крепления покрытия к СПБ варьируется количеством гвоздей: на первом этапе пластинки прибиты только 4 гвоздями по углам пластины; на втором этапе добавляется еще по одному гвоздю по середине сторон пластины; на третьем этапе пластина прибивается по всему контуру через каждые 15 см или 10 см соответственно, таким образом на одной стороне пластины расположены пять гвоздей.

При включении в работу элементов покрытия СПБ загружалась распределенной нагрузкой на элементы покрытия (рисунок 4.8). Загружение осуществлялось в три ступени для СПБ с размером ячейки 0,6×0,6 м, вес каждой ступени составлял 160 Н или 0,028 кН/м^2. Для СПБ с размером ячейки 0,4×0,4 м загружение осуществлялось в две ступени, вес каждой ступени составлял 360 Н или 0,0625 кН/м^2. Максимальной нагрузка, для СПБ с покрытием составила 0,084 кН/м^2 для СПБ с размером ячейки 0,6×0,6 м и 0,125 кН/м^2 для СПБ с размером ячейки 0,4×0,4 м.

Рисунок 4.8 – Загружение СПБ распределенной нагрузкой на элементы покрытия

4.1.3 Методика проведения динамических испытаний

После проведения каждого этапа статических испытаний экспериментальная система разгружалась и находилась в состоянии покоя порядка 20…25 минут, после чего проводились динамические испытания СПБ. В ходе проведения динамических испытаний определялись основные частоты собственных поперечных колебаний системы перекрёстных балок в зависимости

от податливости узловых соединений, схемы опирания и при включении в работу покрытия. Измерения основных частот колебаний выполнялись при помощи виброанализатора «ВИБРАН – 2.0» (рисунок 4.9). Датчик закреплялся снизу в центральном узле СПБ; колебания возбуждались путём удара сверху резиновой киянкой по центральному узлу конструкции.

Рисунок 4.9 – Виброанализатор «ВИБРАН – 2.0»

Значения собственных круговых частот определялись из виброграмм колебаний, исключая переходной процесс стабилизации колебаний, по формуле:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \tag{4.1}$$

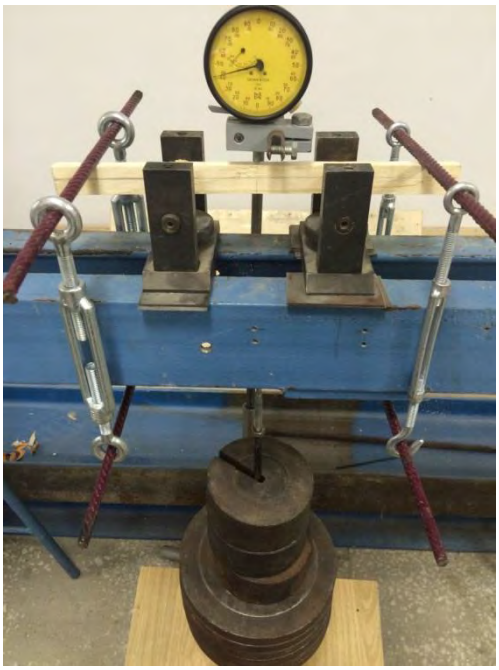
где f – техническая частота колебаний ($с^{-1}$).

Для получения стабильных результатов экспериментальных круговых частот колебаний испытания проводились не менее трёх раз.

4.1.4 Определение кратковременного модуля упругости древесины элементов СПБ

Для нахождения действительного модуля элементов из древесины была изготовлена испытательная установка в соответствии с ГОСТ 16483.9-73 «Методы определения модуля упругости при статическом изгибе», представленная на рисунке 4.10. Образцы для испытаний вырезались из элементов системы перекрёстных балок.

а) б)



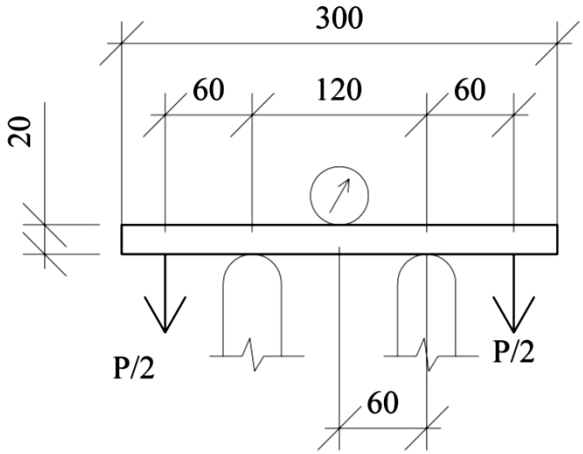


Рисунок 4.10 – Установка для нахождения кратковременного модуля упругости древесины (а – общий вид установки; б – схема нагружения образца)

Длина образцов составляла 300 мм, сечение 10×20(h) мм. Согласно ГОСТ 16483.9-73, испытания образцов выполнялось с постоянной скоростью нагружения до 400 Н за 30 с. После достижения нагрузки 400 Н, образец плавно разгружали до 100 Н, затем его нагружали до 400 Н и разгружали до 100 Н. Показания снимались с помощью индикатора часового типа (МИГ-05101 кл.1 с ценой деления 0,001 мм, диапазон измерений 0,0…1,0 мм) через равные интервалы приращения нагрузки, составлявшие 40 Н. Всего испытано 10 образцов. Результаты испытаний приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Показания индикатора часового типа и вычисленные прогибы при экспериментальном определении модуля упругости

№ об-раз-ца	Показания индикатора часового типа и прогибы S (мм) при нагрузки P (Н)										
	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
1	182	189 0,007	197 0,015	203 0,021	207 0,025	211 0,029	214 0,032	216 0,034	218 0,036	221 0,039	224 0,042
2	223	233 0,01	242 0,019	249 0,026	254 0,031	258 0,035	261 0,038	264 0,041	269 0,046	273 0,05	277 0,054
3	135	143 0,008	151 0,016	156 0,021	161 0,026	165 0,03	169 0,034	172 0,037	174 0,039	175 0,04	176 0,041
4	270	282 0,012	286 0,016	291 0,021	295 0,025	299 0,029	302 0,032	304 0,034	307 0,037	310 0,040	313 0,043

Продолжение таблицы 4.1

5	198	207/0,009	216/0,018	222/0,024	227/0,029	232/0,034	236/0,038	239/0,041	243/0,045	246/0,048	248/0,050
6	182	194/0,012	203/0,021	212/0,03	219/0,037	226/0,044	232/0,050	236/0,054	240/0,058	244/0,062	248/0,066
7	217	223/0,006	227/0,010	231/0,014	234/0,017	236/0,019	238/0,021	242/0,025	245/0,028	247/0,030	249/0,032
8	124	134/0,010	141/0,017	146/0,022	150/0,026	154/0,030	159/0,035	162/0,038	165/0,041	168/0,044	170/0,046
9	150	161/0,011	173/0,023	177/0,027	181/0,031	186/0,036	191/0,041	197/0,047	201/0,051	206/0,056	209/0,059
10	141	150/0,009	158/0,017	165/0,024	172/0,031	178/0,037	184/0,043	188/0,047	192/0,051	196/0,055	199/0,058
$S_{ср}$, мм	-	0,0094	0,0172	0,023	0,0278	0,0323	0,0364	0,0398	0,0432	0,0464	0,049
ν		1,78	2,16	2,18	2,14	2,12	2,10	1,90	1,82	1,79	1,76
$ν_q$		2,26									
E, МПа	-	-	-	-	8277	8829	9690	11685	11686	12416	14715
$E_{ср}$, МПа					11043						

Примечание. В числителе приведены отсчёты по прибору, в знаменателе – прогибы.

В ходе статической обработки результатов измерения задавались доверительной вероятностью $p_д$=0,95 [49]. Также вычислялось наибольшее нормированное отклонение ν:

$$\nu = \frac{max\left|X_i - \overline{X}\right|}{\sigma}, \tag{4.2}$$

где X_i – результаты измерений; $\bar{X}$ – средняя величина результата измерения; σ – среднеквадратическое отклонение.

При проведении статистической обработки результатов испытаний было выявлено, что полученное значение наибольшего нормированного отклонения меньше максимально допустимого ν =1,98< $ν_q$ = 2,26. Таким образом, все результаты испытаний являются достоверными.

По данным таблицы 4.1 построен график в котором прогиб принимался по средним значениям для 10 образцов при каждом этапе нагружения (рисунок 4.11).

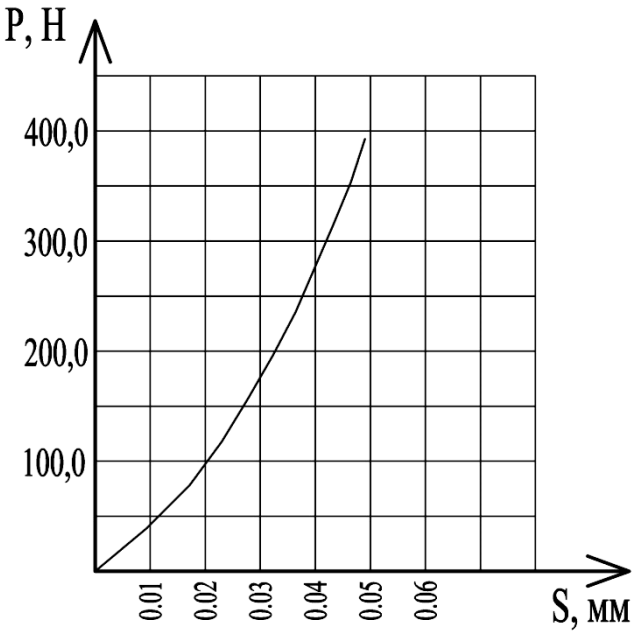


Рисунок 4.11 – Взаимосвязь прогиба от нагрузки при экспериментальном определении модуля упругости

По графику можно сделать вывод о практически линейной зависимости прогиба (S) от нагрузки (P).

Модуль упругости при изгибе в таблице 4.1 в соответствие с ГОСТ 16483.9-73 вычислялся по формуле (МПа):

$$E_i = \frac{3(P_{i+1} - P_i)l^3}{64bh^3(S_{i+1} - S_i)}, \tag{4.3}$$

где l – расстояние между опорами испытательного устройства, мм; b – ширина образца, мм; h – высота образца, мм; $(P_{i+1} - P_i)$ – фиксированное приращение нагрузки, Н; $(S_{i+1} - S_i)$ – приращение прогиба, мм, соответствующее фиксированному приращению нагрузки, определяемому по таблице с точностью до 0,001 мм

Модуль упругости в интервале приращения нагрузки 40-120 Н является ошибкой в серии, это связано со смятием древесины на опоре. Поэтому удаляем эти результаты из серии и находим среднее арифметическое для модуля упругости по 7 результатам.

По результатам вычислений модуль упругости Е для древесины элементов СПБ составил Е =11043 МПа.

4.2 Результаты исследований системы перекрёстных балок на квадратном плане с размером ячеек 0,4 × 0,4 м.

В данном разделе приведены исследования системы перекрёстных балок размером в плане 2400×2400 мм с размерами ячеек 400×400 мм (рисунок 4.12).

Рисунок 4.12 –СПБ с размером ячеек 0,4×0,4 м

По теме данного исследования опубликованы статьи [87…90].

4.2.1 Определение фактической податливости узловых соединений СПБ

На первом этапе выполнены исследования по экспериментальному определению фактической податливости узловых соединений. Для определения фактической податливости узловых соединений проведены численные исследования экспериментальной СПБ по методике, приведённой в разделе 2.2. Результаты исследований СПБ размером в плане 2,4×2,4м с размером ячеек 0,4×0,4 м представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты численных исследований системы перекрёстных балок размером в плане 2,4×2,4 м с размером ячеек 0,4×0,4 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)
1	0,0001	277,57	9,117405
2	0,001	28,16	28,62777

Продолжение таблицы 4.2

3	0,005	5,99	62,09795
4	0,008	3,91	76,86787
5	0,01	3,22	84,75355
6	0,03	1,37	130,0455
7	0,05	1,00	152,3079
8	0,1	0,72	179,3572
9	0,2	0,59	199,7157
10	0,3	0,54	208,2185
11	0,5	0,50	215,865
12	0,6	0,49	217,9124
13	0,8	0,48	220,5557
14	1	0,47	222,1888

Экспериментальная конструкция подвергнута испытаниям, в ходе которых определены прогибы и частоты собственных поперечных колебаний. Результаты испытаний представлены в таблицах 4.3 и 4.4.

По результатам таблицы 4.2 построены графики изменения частот собственных колебаний и прогибов СПБ в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента (рисунок 4.13), на которые наложены значения экспериментальных прогибов и частот колебаний. Таким образом мы нашли фактическую податливость узловых соединений, которая составила $EI_{вс}/EI_{эл}$ =0,0075 при креплении узла 4 болтами, и $EI_{вс}/EI_{эл}$ =0,0035 при креплении узла 2 болтами.

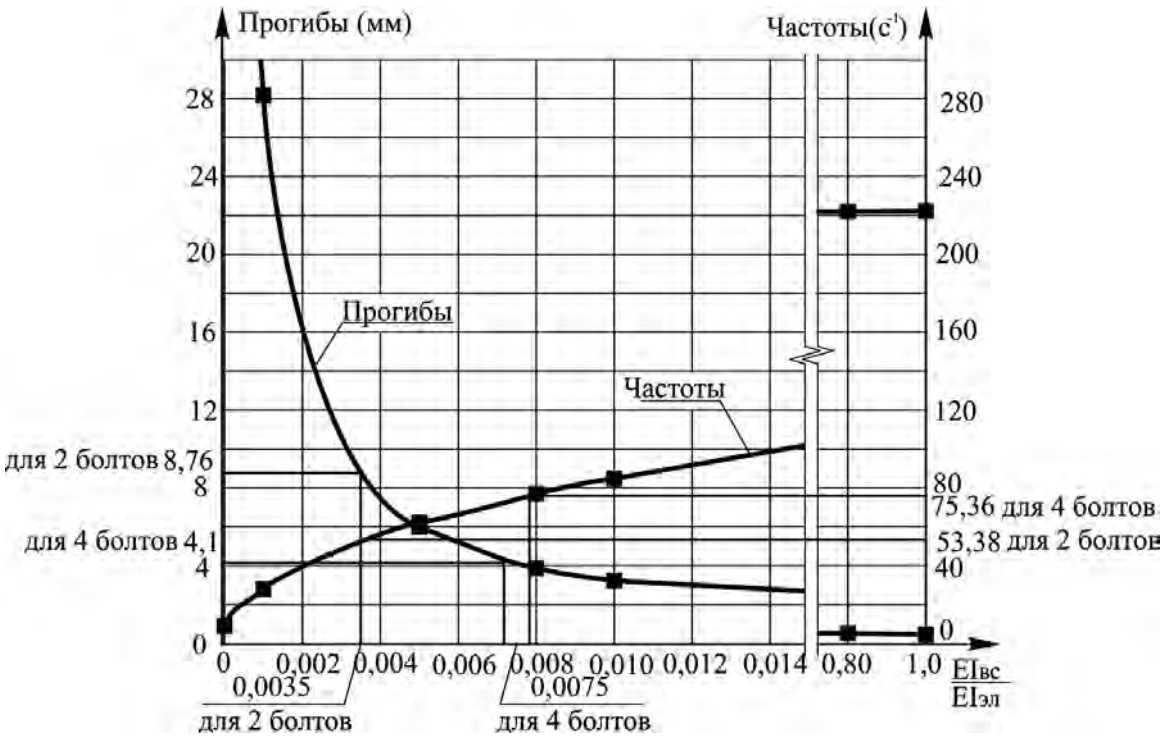
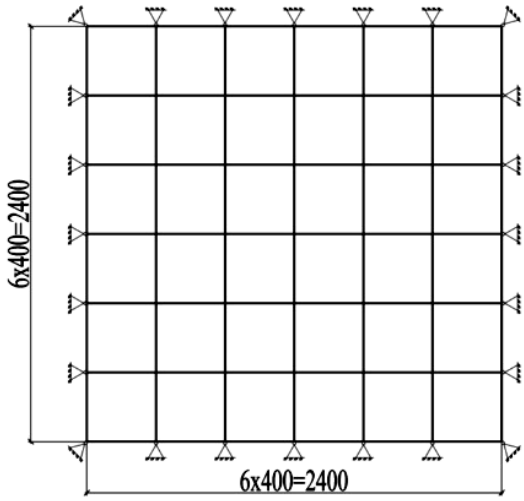


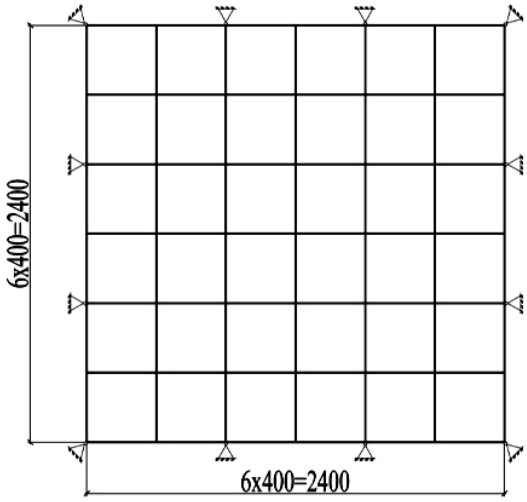
Рисунок 4.13 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов СПБ в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

4.2.2 Результаты исследований систем перекрёстных балок при различной схеме опирания

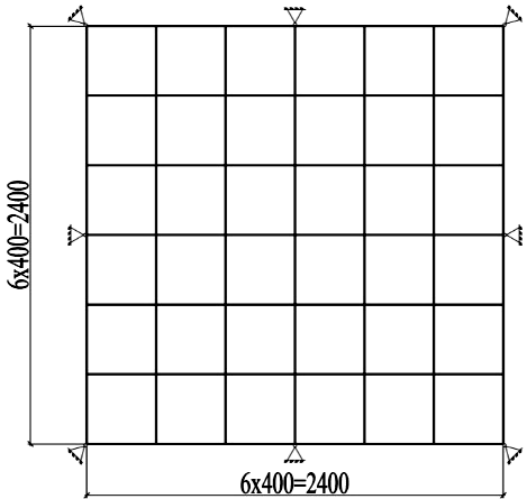
Для нахождения максимального прогиба были проведены статические испытания СПБ по методике, приведённой в пункте 4.1.2. Данные экспериментальных исследований СПБ размером в плане 2,4×2,4 м с размером ячеек 0,4×0,4 м представлены в таблице 4.3.



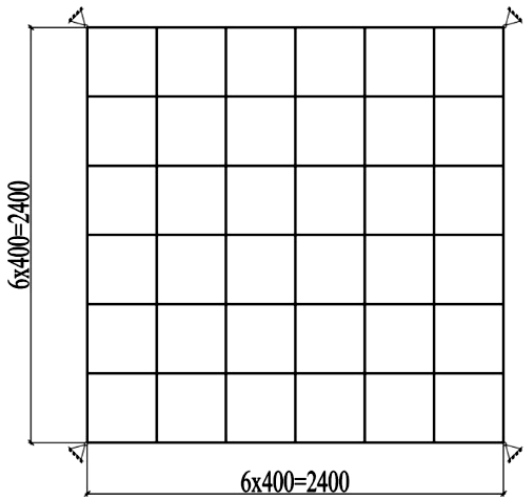
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.14 – Схемы опирания СПБ с размером ячеек 0,4×0,4м (а – 7 опор по стороне; б – 4 опоры по стороне; в – 3 опоры по стороне; г – 2 опоры по стороне)

Таблица 4.3 – Результаты экспериментальных исследований максимального прогиба (мм) при различном количестве опор по одной стороне СПБ

					Максимальный прогиб (мм)		
Нагрузка (Н/м^2)					0,0	43,403	86,806
Количество болтов в узле СПБ 4	Количество опор по одной стороне конструкции	7	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2212	2422	2645
				2	2324	2513	2722
				3	2332	2524	2731
			Средний прогиб по трём загружениям		0,0	1,97	4,1
		4	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2028	2291	2543
				2	2102	2316	2570
				3	2315	2513	2769
			Средний прогиб по трём загружениям		0,0	2,25	4,79
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2468	2750	2996
				2	2512	2767	3002
				3	2567	2810	3055
			Средний прогиб по трём загружениям		0,0	2,6	5,02
		2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	5329	7125	-
				2	5965	7387	-
				3	6349	7721	-
			Средний прогиб по трём загружениям		0,0	15,6	-

Продолжение таблицы 4.3

Количество болтов в узле СПБ 2	Количество опор по одной стороне конструкции	7	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	7504	8070	8411
				2	7611	8101	8109
				3	8411	8478	8489
			Средний прогиб по трём загружениям		0,0	5,1	8,76
		4	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1971	2656	3096
				2	2105	2671	3058
				3	2184	2661	3073
			Средний прогиб по трём загружениям		0,0	5,76	9,89
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2489	3304	3711
				2	2869	3491	4003
				3	2979	3528	4064
			Средний прогиб по трём загружениям		0,0	6,62	11,47
		2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	-	-	-
				2	-	-	-
				3	-	-	-
			Средний прогиб по трём загружениям		-	-	-

Примечание. В ячейках таблицы, где проставлены прочерки, система перестаёт работать в упругой стадии, в связи с чем эти результаты в исследованиях не учитывались.

По данным таблицы 4.3 построен график изменения прогибов в зависимости количества опор по одной стороне конструкции.

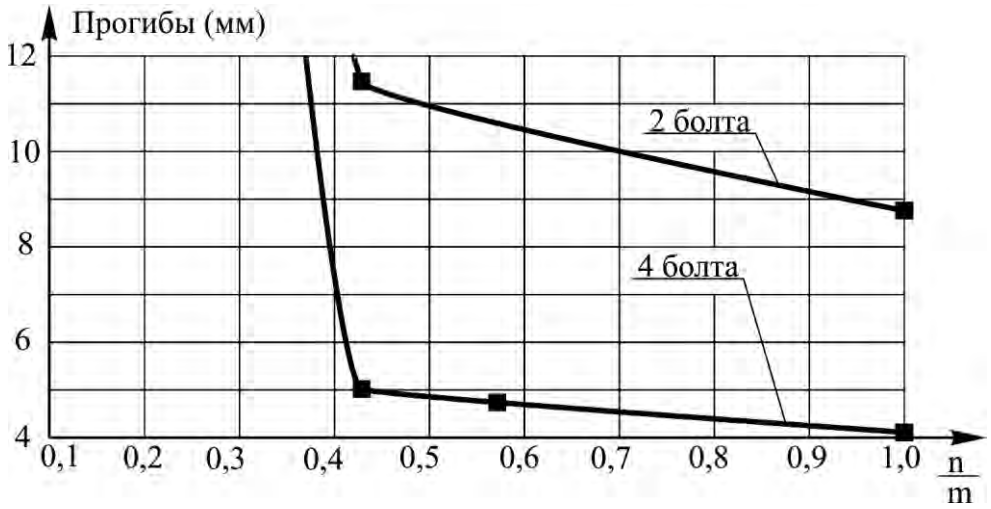


Рисунок 4.15 – Изменение максимальных прогибов в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне (n – количество опор в контурных узлах по одной стороне конструкции, m – количество контурных узлов по одной стороне)

Для нахождения частот собственных колебаний СПБ подвергалась динамическим испытаниям по методике, предложенной в пункте 4.1.3.

Виброграммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рисунке 4.16 при 4 болтах в узле и на рисунке 4.17 при 2 болтах в узле.

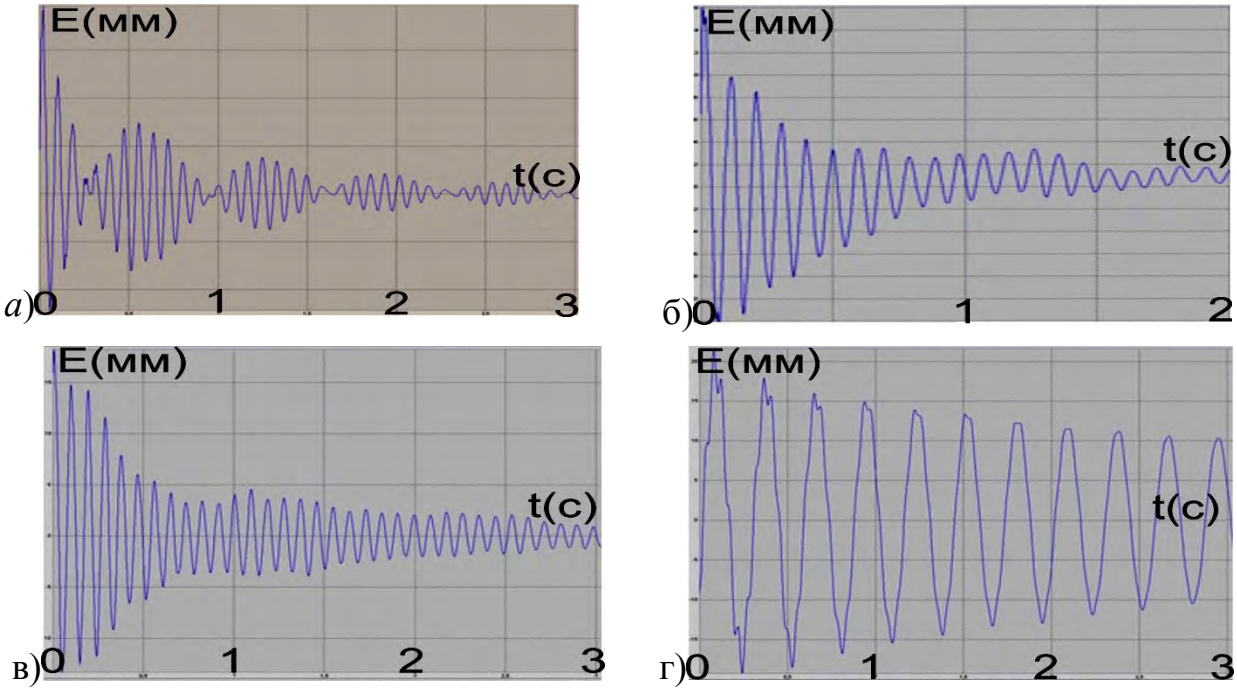


Рисунок 4.16 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ при 4 болтах в узле в зависимости от схемы опирания (*а* – 7 опор, б – 4 опоры, в – 3 опоры, г – 2 опоры)

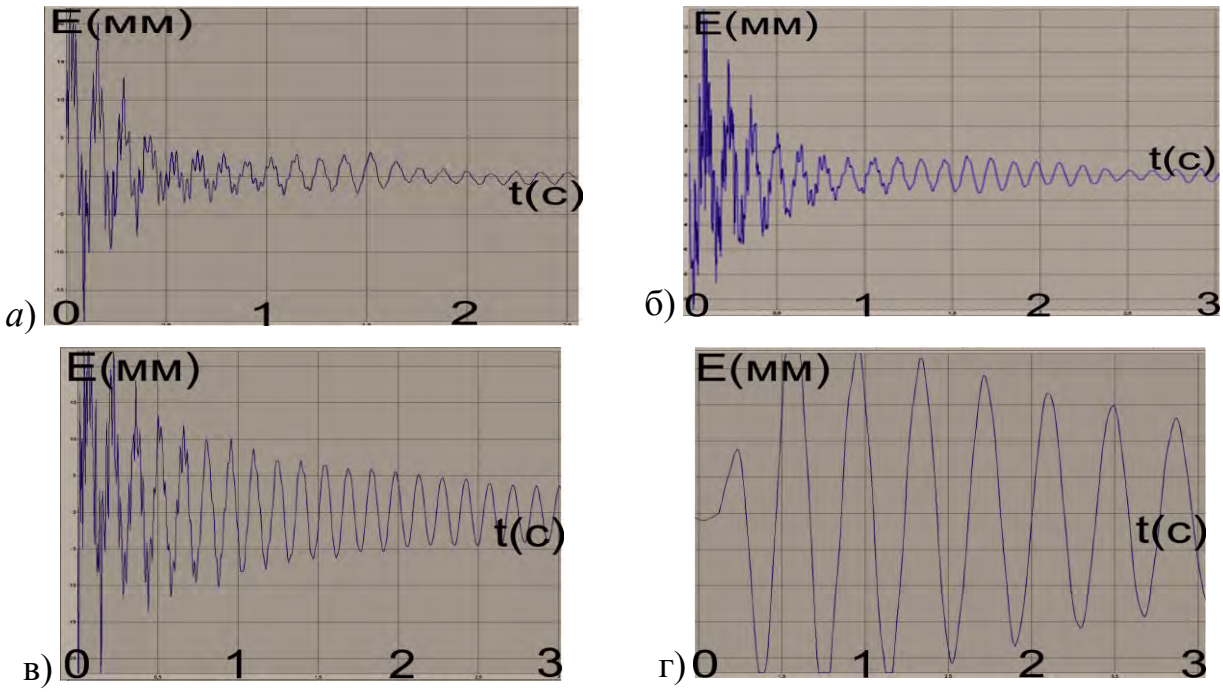


Рисунок 4.17 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ, при 2 болтах в узле, в зависимости от схемы опирания (а – 7 опор, б – 4 опоры, в – 3 опоры, г – 2 опоры)

Результаты динамических испытаний представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Экспериментальные частоты собственных колебаний СПБ при различной жёсткости крепления узловых соединений, при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4		Кол-во болтов в узле 2	
		Частота, f (с$^{-1}$)	Круговая частота, ω (с$^{-1}$)	Частота, f (с$^{-1}$)	Круговая частота, ω (с$^{-1}$)
Количество опор по одной стороне	7	12,00	75,36	8,50	53,38
	4	11,20	70,34	8,10	50,87
	3	11,00	69,08	7,60	47,73
	2	4,10	25,75	3,40	21,35

По результатам таблицы 4.4 построен график изменения частот собственных колебаний в зависимости количества опор по одной стороне конструкции.

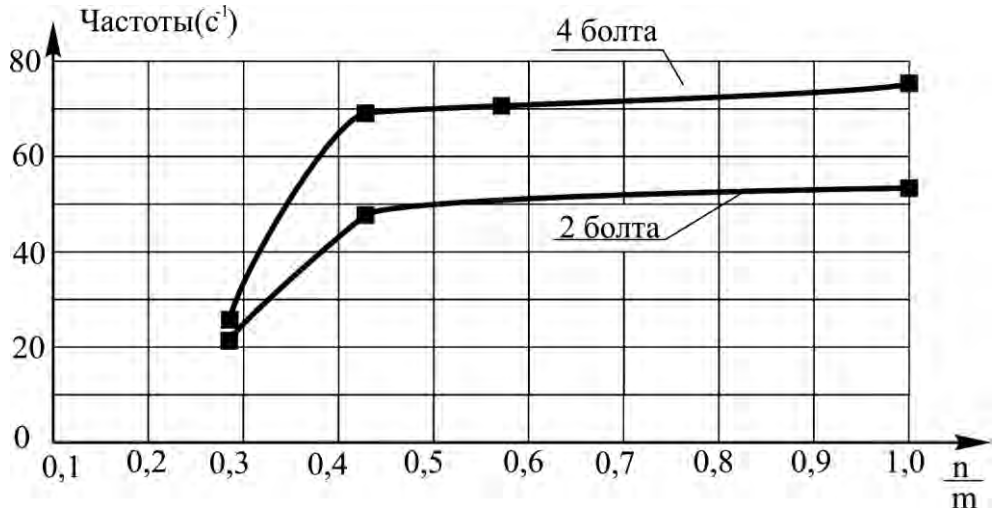


Рисунок 4.18 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

Данные экспериментальных и численных исследований изложены в таблице 4.5. Критерием точности является коэффициент К, связывающий частоту собственных поперечных колебаний СПБ ω и максимальный прогиб W_0 при действии равномерно распределенной нагрузки q в формуле В.И. Коробко (4.4).

$$W_0 \cdot \omega^2 = K\frac{q}{m}, \tag{4.4}$$

Теоретическое значение коэффициента для квадратных пластин с шарнирно опертым контуром составляет $K_{теор}$=1,582.

Для СПБ в зависимости от схемы опирания разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 0,97% до 23,72%, а между частотами – от 0,89% до 13,30%.

Разница между теоретическими и экспериментальными значениями коэффициента К достигает 13,24%. Стоит отметить, что уравнение (4.4) выведена для изотропных пластин, непрерывно опёртых по контуру, вследствие этого возникают отклонения при экспериментальном определении коэффициента К при малом числе опор СПБ.

Таблица 4.5 – Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований для СПБ при различной жёсткости узлов и при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4				Кол-во болтов в узле 2			
		Кол-во опор по одной стороне				Кол-во опор по одной стороне			
		7	4	3	2	7	4	3	2
Максимальный прогиб W_o(мм)	Эксперимент	4,10	4,79	5,02	15,6	8,76	9,89	11,47	-
	Численно	4,14	5,36	6,17	11,9	8,37	10,12	11,00	26,71
Откл. эксп. от числ. (%)		0,97	10,63	18,63	23,72	4,45	2,27	4,10	-
Круговая частота, ω (c^{-1})	Эксперимент	75,36	70,34	69,08	25,74	53,38	50,87	47,73	21,35
	Численно	74,69	65,31	60,63	29,69	52,54	47,52	45,40	19,02
Откл. эксп. от числ. (%)		0,89	7,15	12,23	13,30	1,57	6,59	4,88	10,91
К по (4.4)	Эксперимент	1,581	1,610	1,627	1,405	1,695	1,738	1,775	-
	Численно	1,569	1,553	1,540	1,426	1,569	1,551	1,540	1,313
Откл. эксп. от числ. (%)		0,76	3,54	5,35	1,47	7,43	10,76	13,24	-
$K_{теор}$		1,582							
Отклонение К от $K_{теор}$ (%)	Эксперимент	0,03	1,74	2,85	11,20	6,69	8,99	10,86	-
	Численно	0,84	1,89	2,63	9,87	0,85	1,93	2,66	17,00

На основании исследования можно сделать вывод о достаточно хорошей сходимости результатов численных и экспериментальных прогибов и частот собственных колебаний, а также соответствие экспериментального коэффициента К и его применимость для систем перекрёстных балок.

4.2.3 Результаты исследований СПБ с покрытием при изменении жёсткости крепления покрытия к элементам СПБ

Экспериментальная конструкция СПБ с покрытием представлена на рисунке 4.19.

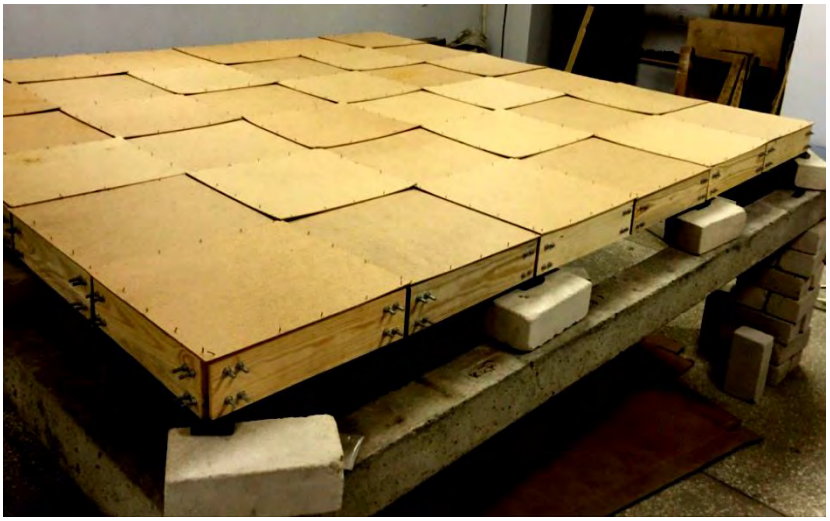


Рисунок 4.19 –СПБ с покрытием с размером ячеек 0,4×0,4 м

На первом этапе выполнены исследования по экспериментальному определению фактической податливости крепления покрытия к элементам СПБ. Для этого численным методом определены прогибы и частоты колебаний экспериментальной конструкции по методике, описанной в разделе 3.3. Жесткость вертикальных конечных элементов изменялась от 0 (в практических расчётах принято $EI_x = 10^{-5}$кН·м^2; $EI_y = 10^{-5}$кН·м^2; $GI_{кр} = 10^{-5}$кН·м^2, EA = $1{,}1\cdot10^4$ кН) до достаточно большой ($EI_x=10^3$ кН·м^2; $EI_y=10^3$ кН·м^2; $GI_{кр}=10^3$ кН·м^2, EA = $1{,}1\cdot10^4$ кН), при которой изменение прогибов и частот колебаний стабилизировалось. При жёсткости вертикальных элементов, равных 0, покрытие не включается в совместную работу с системой перекрёстных балок, а при очень большой жёсткости вертикальных элементов податливость связей, крепящих элементы покрытия к СПБ, отсутствует. Соотношение жёсткости вставки к жёсткости элемента самой системы перекрёстных балок принято постоянным $EI_{вс}/EI_{эл}$ =0,0075 при креплении узла 4 болтами и $EI_{вс}/EI_{эл}$ =0,0035 при креплении узла 2 болтами. По результатам исследований определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок. Результаты исследований СПБ с покрытием представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты численных исследований системы перекрёстных балок с покрытием размером в плане 2,4×2,4м с размером ячеек 0,4×0,4 м

№ п/п	EI_x; EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)
1	10^3	0,92	156,1847
2	10^2	0,92	156,1117
3	10^1	0,93	155,3989
4	10^0	0,98	149,4740
5	10^{-1}	1,33	123,9000
6	10^{-2}	2,29	94,1597
7	10^{-3}	3,31	79,4695
8	10^{-4}	3,67	75,9936
9	10^{-5}	3,71	75,5790

По результатам исследования был построен график изменение частот собственных колебаний и прогибов СПБ в зависимости от жёсткости вертикальных элементов, крепящих элементы покрытия к СПБ (рисунок 4.20).

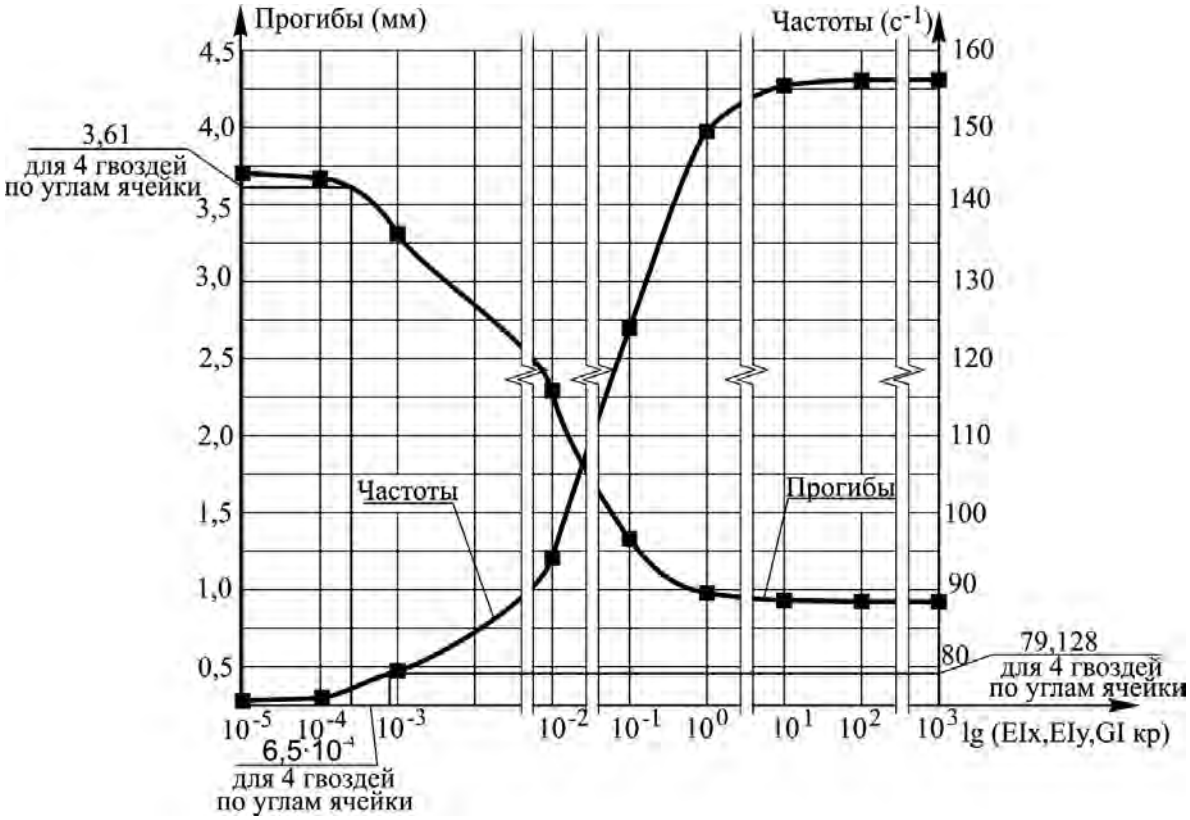


Рисунок 4.20 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов в зависимости от жёсткости вертикальных элементов, крепящих покрытие к элементам СПБ

На график были нанесены значения частот колебаний и прогибов, полученные в результате экспериментов при креплении покрытия 4 вертикальными элементами по углам ячейки. Таким образом была определена фактическая жесткость вертикальных элементов, которая составила $EI_x = 6{,}5 \cdot 10^{-4}$ Кн·м^2; $EI_y = 6{,}5 \cdot 10^{-4}$ Кн·м^2; $GI_{кр} = 6{,}5 \cdot 10^{-4}$ Кн·м^2, $EA = 1{,}1 \cdot 10^4$ Кн.

Результаты экспериментальных исследований СПБ с покрытием представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты экспериментального определения максимального прогиба (мм) СПБ при различной жёсткости крепления узловых соединений и жёсткости крепления покрытия

					Максимальный прогиб(мм)		
Нагрузка, (Н/м^2)					0	62,5	125,0
Количество болтов в узле СПБ 4	Количество гвоздей по одной стороне ячейки	2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2001	21,81	23,88
				2	2007	21,69	23,65
				3	2016	21,55	23,54
			Средний прогиб по трём загружениям		0	1,60	3,61
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2062	2222	2396
				2	2068	2219	2392
				3	2075	2205	2389
			Средний прогиб по трём загружениям		0	1,47	3,24
		5	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2108	2242	2406
				2	2114	2250	2409
				3	2127	2262	2416
			Средний прогиб по трём загружениям		0	1,35	2,94
Количество болтов в узле СПБ 2	Количество гвоздей по одной стороне ячейки	2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1621	1963	2281
				2	1630	1961	2272
				3	1607	1930	2243
			Средний прогиб по трём загружениям		0	3,32	6,46
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1657	1979	2254
				2	1696	1993	2251
				3	1742	2017	2276
			Средний прогиб по трём загружениям		0	2,98	5,62
		5	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1770	2066	2316
				2	1815	2089	2343
				3	1920	2187	2421
			Средний прогиб по трём загружениям		0	2,76	5,25

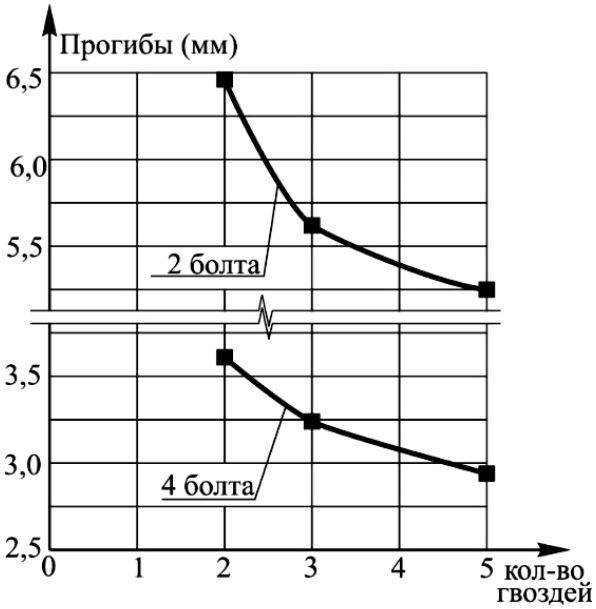
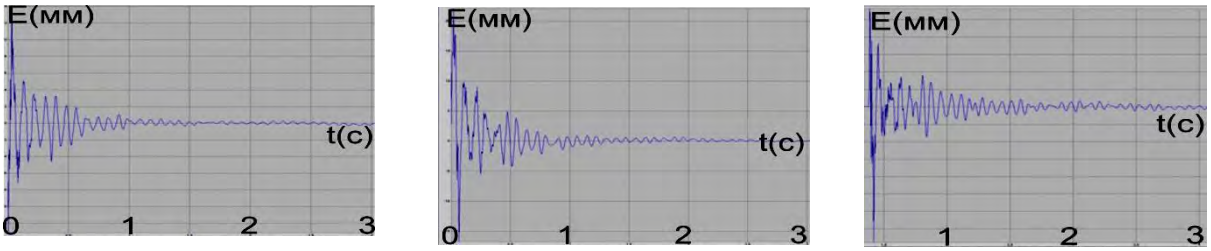


Рисунок 4.21 – Изменение прогибов в зависимости от жёсткости крепления покрытия

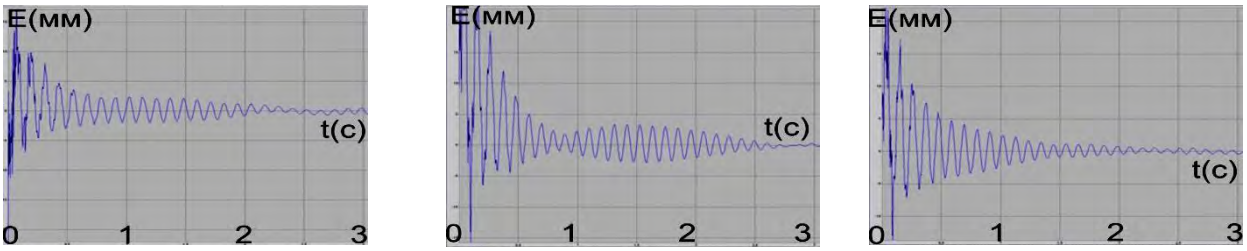
По данным таблицы 4.7 построен график изменения прогибов в зависимости жёсткости крепления покрытия.

Виброграммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рисунке 4.22 при 4 болтах в узле и на рисунке 4.23 при 2 болтах в узле.



а) б) в)

Рисунок 4.22 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием при 4 болтах в узле в зависимости от жёсткости крепления покрытия (а –2 гвоздя по стороне ячейки, б – 3 гвоздя, в – 5 гвоздей)



а) б) в)

Рисунок 4.23 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием, при 2 болтах в узле, в зависимости от жёсткости крепления покрытия (а –2 гвоздя по стороне ячейки, б – 3 гвоздя, в – 5гвоздей)

Результаты динамических испытаний представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Экспериментальные частоты собственных колебаний СПБ при различной жёсткости крепления узловых соединений и жёсткости крепления покрытия

		Кол-во болтов в узле 4		Кол-во болтов в узле 2	
		Частота, f ($с^{-1}$)	Круговая частота, ω ($с^{-1}$)	Частота, f ($с^{-1}$)	Круговая частота, ω ($с^{-1}$)
Количество гвоздей по одной стороне покрытия	2	12,60	79,13	9,40	59,03
	3	13,20	82,90	10,10	63,43
	5	14,00	87,92	10,50	65,94

По данным таблицы 4.8 построен график изменение частот собственных колебаний в зависимости количества гвоздей по одной стороне ячейки.

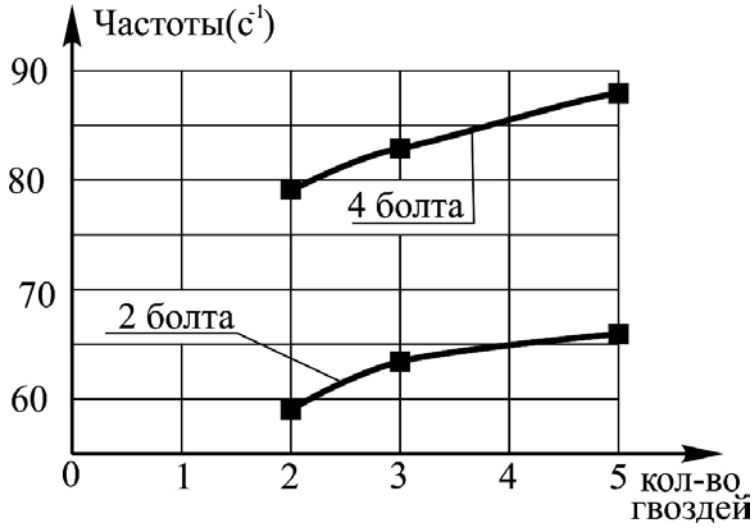


Рисунок 4.24 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от жёсткости крепления покрытия к СПБ

Результаты сравнения экспериментальных и численных исследований изложены в таблице 4.9.

Анализ полученных данных показывает, что независимо от податливости узловых соединений и жёсткости крепления покрытия экспериментальные прогибы и частоты больше полученных численным способом.

Для СПБ в зависимости от жёсткости крепления покрытия к системе разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,70% до 5,34%, между частотами – от 1,12% до 4,11%. Для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными составила до 10,19%.

Таблица 4.9 – Сопоставление экспериментальных и теоретических результатов исследования СПБ при различной жёсткости крепления узловых соединений и жёсткости крепления покрытия

		Кол-во болтов в узле 4			Кол-во болтов в узле 2		
		Кол-во гвоздей по одной стороне покрытия			Кол-во гвоздей по одной стороне покрытия		
		2	3	5	2	3	5
Максимальный прогиб W_o(мм)	Эксперимент	3,61	3,24	2,94	6,46	5,62	5,25
	Численно	3,43	3,16	2,89	6,31	5,32	5,11
Откл. эксп. от числ. (%)		4,99	2,47	1,70	2,32	5,34	2,67
Круговая частота, ω (c^{-1})	Эксперимент	79,13	82,90	87,92	59,03	63,43	65,94
	Численно	78,24	80,95	84,39	57,41	62,14	63,32
Откл. эксп. от числ. (%)		1,12	2,35	4,02	2,74	2,03	4,11
К по (4.4)	Эксперимент	1,535	1,512	1,544	1,529	1,536	1,550
	Численно	1,426	1,407	1,398	1,413	1,396	1,392
Откл. эксп. от числ. (%)		7,10	6,94	9,46	7,59	9,11	10,19
$K_{теор}$		1,582					
Отклонение К от $K_{теор}$ (%)	Эксперимент	2,95	4,40	2,42	3,35	2,92	1,99
	Численно	9,85	11,08	11,62	10,67	11,78	12,02

4.2.4 Результаты исследований СПБ с покрытием при различной схеме опирания

В данном разделе исследуется СПБ с покрытием, прикреплённом 5 гвоздями по каждой стороне ячейки, при различных схемах опирания конструкции.

Результаты экспериментальных исследований СПБ с покрытием при различных схемах опирания представлены в таблице 4.10.

По данным таблицы 4.10 построен график изменения прогибов в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции.

Таблица 4.10 – Результаты экспериментальных исследований максимального прогиба (мм) при различном количестве опор по одной стороне СПБ с покрытием

					Максимальный прогиб (мм)		
Нагрузка, (Н/м^2)					0	62,5	125,0
Количество болтов в узле СПБ 4	Количество опор по одной стороне конструкции	7	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2108	2242	2406
				2	2114	2250	2409
				3	2127	2262	2416
			Средний прогиб по трём загружениям		0	1,35	2,94
		4	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2245	2390	2558
				2	2249	2393	2550
				3	2251	2397	2546
			Средний прогиб по трём загружениям		0	1,45	3,03
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2237	2413	2602
				2	2287	2450	2625
				3	2305	2458	2634
			Средний прогиб по трём загружениям		0	1,64	3,44
		2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2380	3634	4611
				2	2419	3607	4602
				3	2445	3615	4610
			Средний прогиб по трём загружениям		0	12,04	21,93
Количество болтов в узле СПБ 2	Количество опор по одной стороне конструкции	7	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1770	2066	2316
				2	1815	2089	2343
				3	1920	2187	2421
			Средний прогиб по трём загружениям		0	2,76	5,25
		4	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1885	2204	2492
				2	1956	2238	2477
				3	2107	2364	2611
			Средний прогиб по трём загружениям		0	2,86	5,44
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2151	2493	2847
				2	2320	2620	2981
				3	2512	2779	3147
			Средний прогиб по трём загружениям		0	3,03	6,64
		2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	131	2385	-
				2	1187	3401	-
				3	1274	3457	-
			Средний прогиб по трём загружениям		0	22,17	-

Примечание. В ячейках таблицы, где проставлены прочерки, система перестаёт работать в упругой стадии, в связи с чем эти результаты в исследованиях не учитывались.

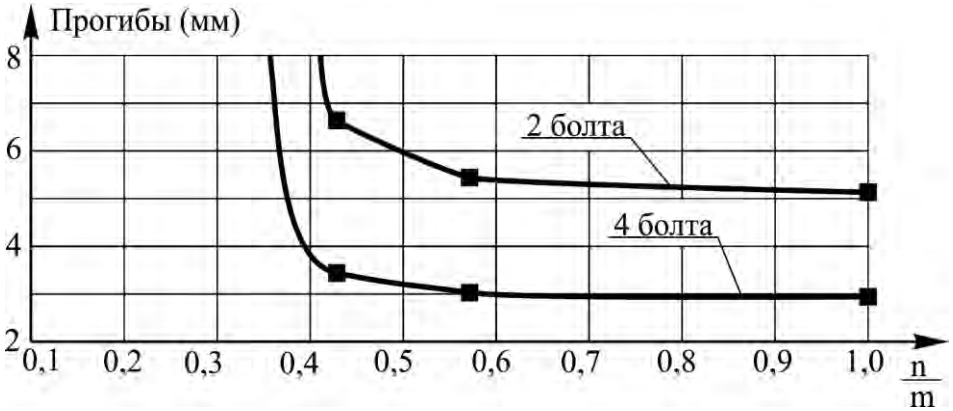


Рисунок 4.25 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне (n – количество опор в контурных узлах по одной стороне конструкции, m – количество контурных узлов по одной стороне)

Виброграммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рисунке 4.26 при 4 болтах в узле и на рисунке 4.27 при 2 болтах в узле.

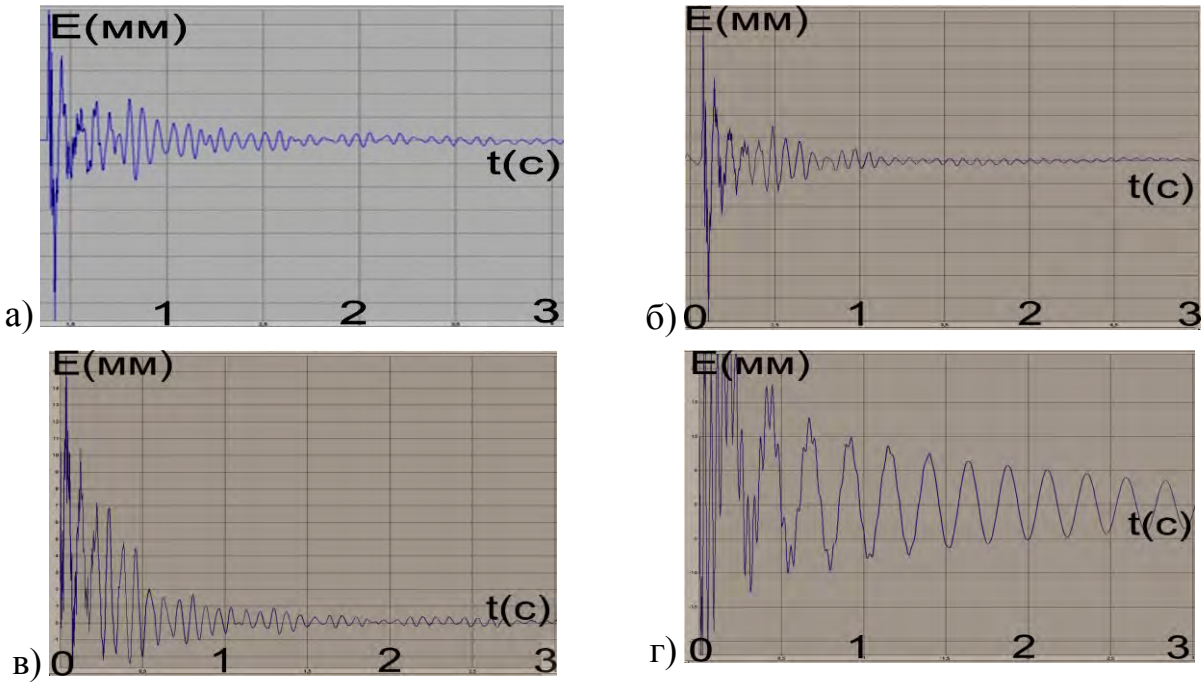


Рисунок 4.26 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием при 4 болтах в узле в зависимости от схемы опирания (а – 7 опор, б – 4 опоры, в – 3 опоры, г – 2 опоры)

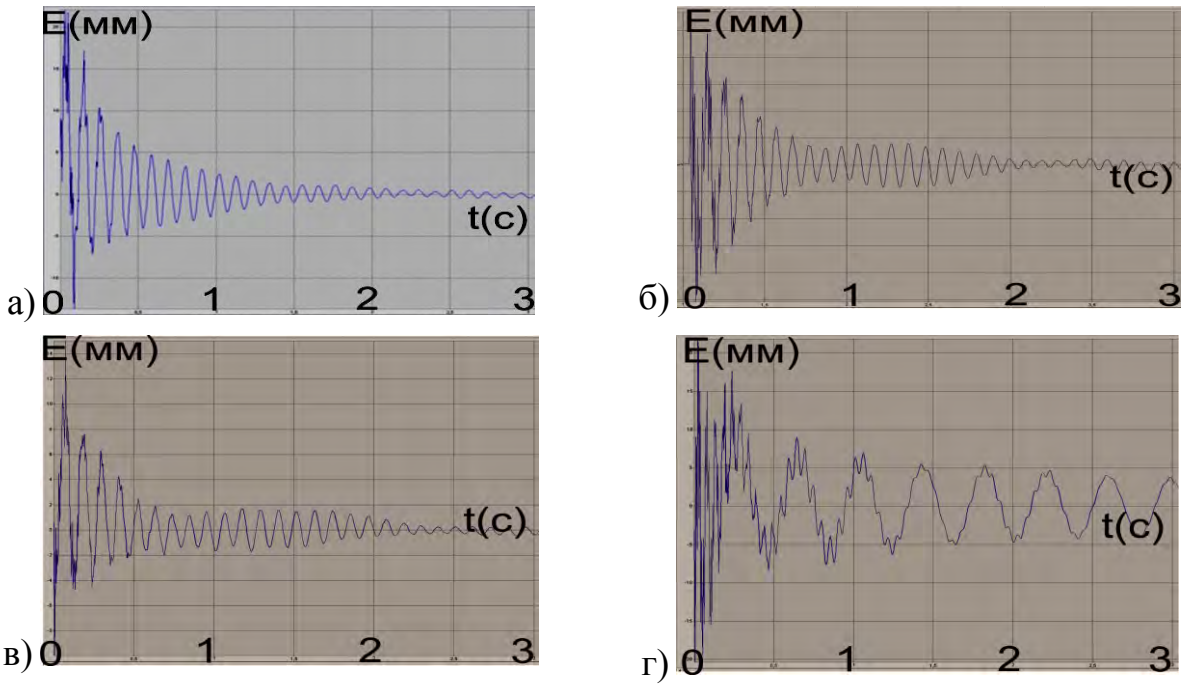


Рисунок 4.27 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием при 2 болтах в узле в зависимости от схемы опирания
(а – 7 опор, б – 4 опоры, в – 3 опоры, г – 2 опоры)

Результаты динамических испытаний представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Экспериментальные частоты собственных колебаний СПБ с покрытием при различной жёсткости крепления узловых соединений, при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4		Кол-во болтов в узле 2	
		Частота, f ($с^{-1}$)	Круговая частота, ω ($с^{-1}$)	Частота, f ($с^{-1}$)	Круговая частота, ω ($с^{-1}$)
Количество опор по одной стороне	7	14,00	87,92	10,50	65,94
	4	13,40	84,15	10,30	64,68
	3	12,80	80,38	9,60	60,29
	2	5,00	31,40	3,50	21,98

По данным таблицы 4.11 построен график изменения частот собственных колебаний в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции.

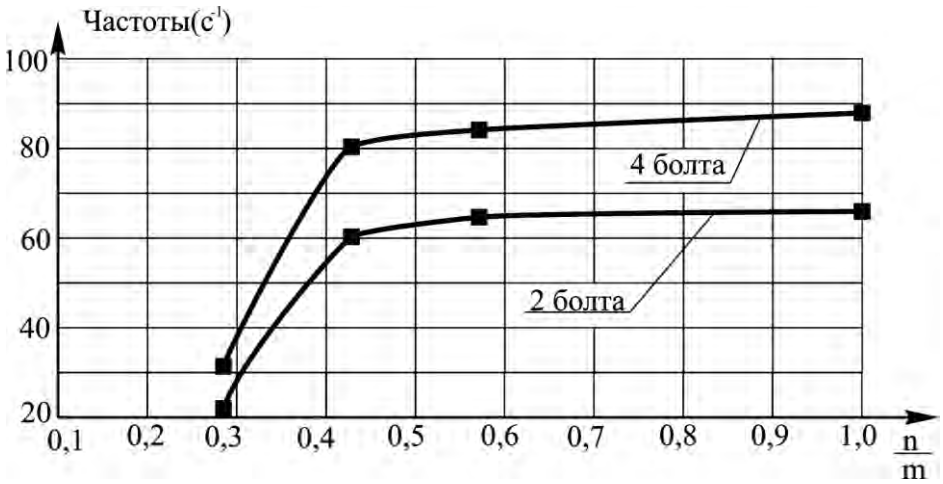


Рисунок 4.28 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне

Результаты сопоставления результатов экспериментальных и численных исследований представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Сопоставление экспериментальных и теоретических данных для СПБ с покрытием при различной жёсткости узлов и при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4				Кол-во болтов в узле 2			
		Кол-во опор по одной стороне				Кол-во опор по одной стороне			
		7	4	3	2	7	4	3	2
Максимальный прогиб W_o(мм)	Эксперимент	2,94	3,03	3,44	21,93	5,25	5,44	6,64	-
	Численно	2,89	2,93	3,39	20,43	5,11	5,26	6,20	35,18
Откл. эксп. от числ. (%)		1,70	3,30	1,45	6,84	2,67	3,31	6,63	-
Круговая частота, ω (c^{-1})	Эксперимент	87,92	84,15	80,38	31,40	65,94	64,68	60,28	21,98
	Численно	84,39	83,02	77,40	30,54	63,32	61,92	57,30	23,06
Откл. эксп. от числ. (%)		4,02	1,33	3,71	2,74	4,11	4,27	4,94	4,68
К по (4.4)	Эксперимент	1,544	1,457	1,510	1,469	1,550	1,546	1,639	-
	Численно	1,398	1,372	1,380	1,294	1,392	1,370	1,383	1,271
Откл. эксп. от числ. (%)		9,46	5,83	8,61	11,91	10,19	11,38	15,62	-
$K_{теор}$		1,582							
Отклонение К от $K_{теор}$ (%)	Эксперимент	2,42	7,87	4,56	7,16	1,99	2,27	3,62	-
	Численно	11,62	13,29	12,79	18,18	12,02	13,41	12,58	19,64

Анализ полученных данных показывает, что независимо от податливости узловых соединений СПБ, податливости связей, крепящих покрытие к конструкции, и схемы опирания экспериментальные прогибы и частоты больше полученных численным способом, за исключением частоты при 2-х болтах в узле, и при опирании системы только по углам, в этом случае экспе-

риментальные частоты меньше полученных численным путем.

Для СПБ в зависимости от схемы опирания разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,70% до 6,84%, а разница между частотами составляет от 1,33% до 4,68%. Для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными составила до 15,62%.

4.3 Результаты исследований систем перекрёстных балок на квадратном плане с размером ячеек 0,6 × 0,6 м.

В данном разделе приведены результаты исследований системы перекрёстных балок размером в плане 2400×2400 мм с размерами ячеек 600×600 мм (рисунок 4.29).

Рисунок 4.29 –СПБ с размером ячеек 0,6×0,6 м

4.3.1 Определение фактической податливости узловых соединений СПБ

На первом этапе выполнены исследования по экспериментальному определению фактической податливости узловых соединений. Для определения фактической податливости узловых соединений проведены численные исследования экспериментальной СПБ по методике, приведённой в разделе

2.2. Результаты исследований СПБ размером в плане 2,4×2,4м с размером ячеек 0,6×0,6 м представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Результаты численных исследований системы перекрёстных балок размером в плане 2,4×2,4м с размером ячеек 0,6×0,6 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)
1	0,0001	217,79	16,10463
2	0,001	22,48	50,16216
3	0,005	5,11	105,4159
4	0,008	3,48	127,8776
5	0,01	2,94	139,2985
6	0,03	1,49	196,6515
7	0,05	1,20	219,7519
8	0,1	0,98	243,7167
9	0,2	0,87	259,1083
10	0,3	0,84	264,934
11	0,5	0,81	269,8924
12	0,6	0,80	271,1767
13	0,8	0,79	272,8086
14	1	0,78	273,8021

Экспериментальная конструкция подвергнута испытаниям, по результатам которых определены прогибы и частоты собственных поперечных колебаний. Результаты испытаний приведены в таблицах 4.14 и 4.15.

По данным таблицы 4.13 был построен график изменения частот собственных колебаний и прогибов СПБ в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента (рисунок 4.30), на которые наложены значения экспериментальных прогибов и частот колебаний. Таким образом была определена фактическая податливость узлов, которая составила $EI_{вс}/EI_{эл}$ =0,0033 при креплении узла 4 болтами, и $EI_{вс}/EI_{эл}$ =0,0013 при креплении узла 2 болтами.

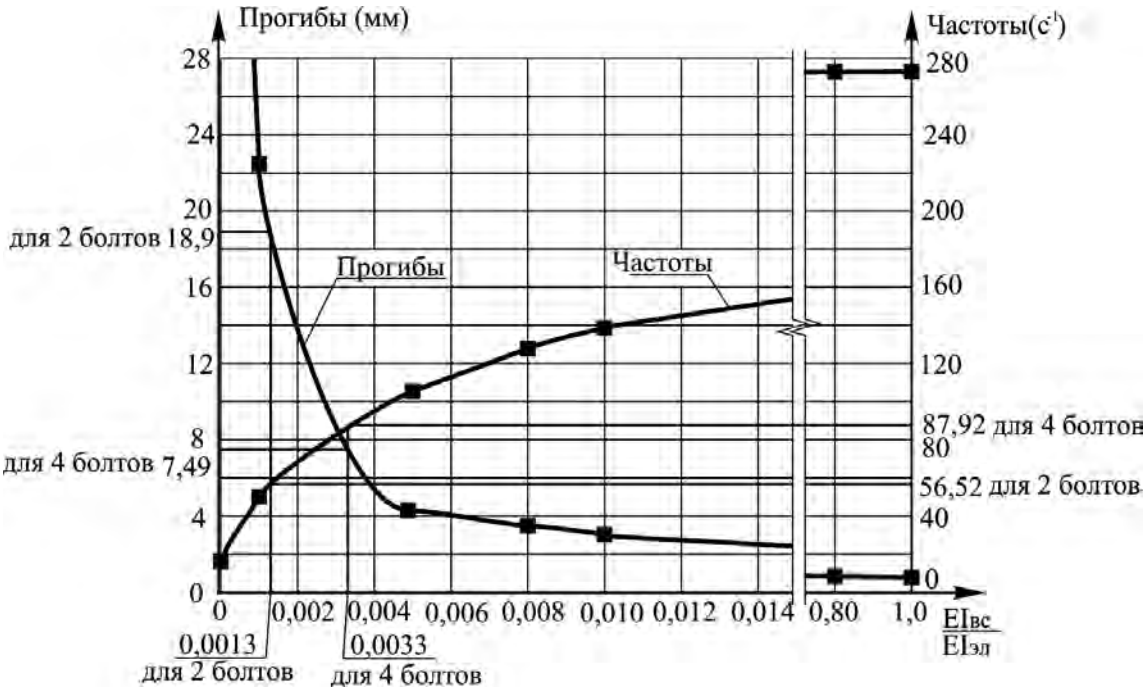
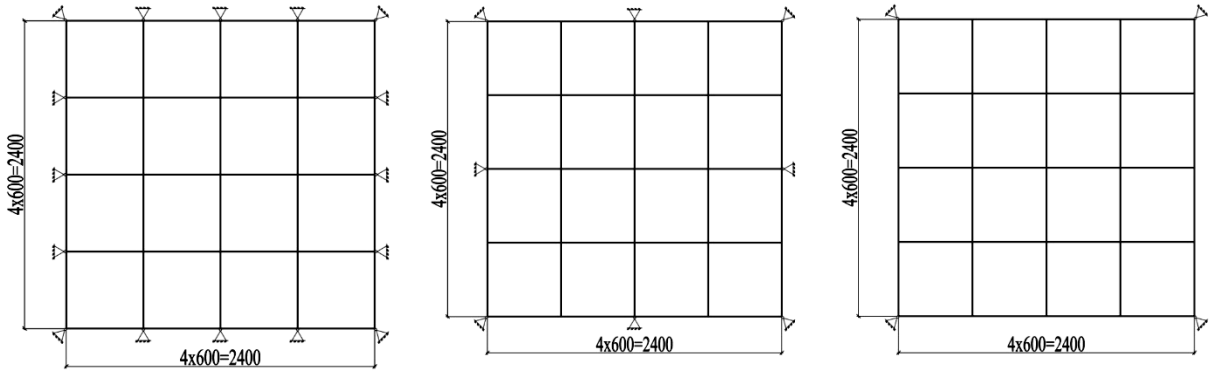


Рисунок 4.30 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов СПБ в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента

4.3.2 Результаты исследований при различной схеме опирания

Различные схемы опирания СПБ представлены на рисунке 4.31. Для определения максимального прогиба СПБ подвергалась статическим испытаниям по методике, приведённой в пункте 4.1.2. Результаты экспериментальных исследований СПБ размером в плане 2,4×2,4м с размером ячеек 0,6×0,6 м представлены в таблице 4.14.



а) б) в)

Рисунок 4.31 – Схемы опирания СПБ с размером ячеек 0,6×0,6м
(а – 5 опор по стороне; б – 3 опоры по стороне; в – 2 опоры по стороне)

Таблица 4.14 – Результаты экспериментальных исследований максимального прогиба (мм) при различном количестве опор по одной стороне СПБ

					Максимальный прогиб (мм)					
Нагрузка, (Н/м^2)					0,0	15,625	31,25	46,875	62,50	78,125
Количество болтов в узле СПБ 4	Количество опор по одной стороне конструкции	5	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1169	1214	1463	1622	1768	1935
				2	1075	1107	1349	1484	1651	1824
				3	1011	1039	1274	1403	1576	1743
			Средний прогиб		0,0	0,35	2,77	4,18	5,80	7,49
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1150	1314	1471	1643	1817	1991
				2	1199	1343	1515	1681	1850	2028
				3	1479	1609	1778	1938	2114	2293
			Средний прогиб		0,0	1,46	3,12	4,78	6,51	8,28
		2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	665	1270	1886	2551	-	-
				2	869	1448	2059	2724	-	-
				3	775	1343	1952	2626	-	-
			Средний прогиб		0,0	5,84	11,96	18,64	-	-
Количество болтов в узле СПБ 2	Количество опор по одной стороне конструкции	5	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1892	2305	2676	2925	3351	3801
				2	1934	2327	2692	2951	3366	3819
				3	1988	2346	2720	3001	3408	3864
			Средний прогиб		0,0	3,88	7,58	10,21	14,37	18,90
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1332	1741	2155	2650	-	-
				2	861	1253	1674	2165	-	-
				3	897	1254	1694	2187	-	-
			Средний прогиб		0,0	3,86	8,11	13,04	-	-
		2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	-	-	-	-	-	-
				2	-	-	-	-	-	-
				3	-	-	-	-	-	-
			Средний прогиб		-	-	-	-	-	-

Примечание. В ячейках таблицы, где стоят прочерки, система перестаёт работать в упругой стадии, в связи с чем эти результаты в исследованиях не учитывались.

По данным таблицы 4.14 построен график изменения прогибов в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции.

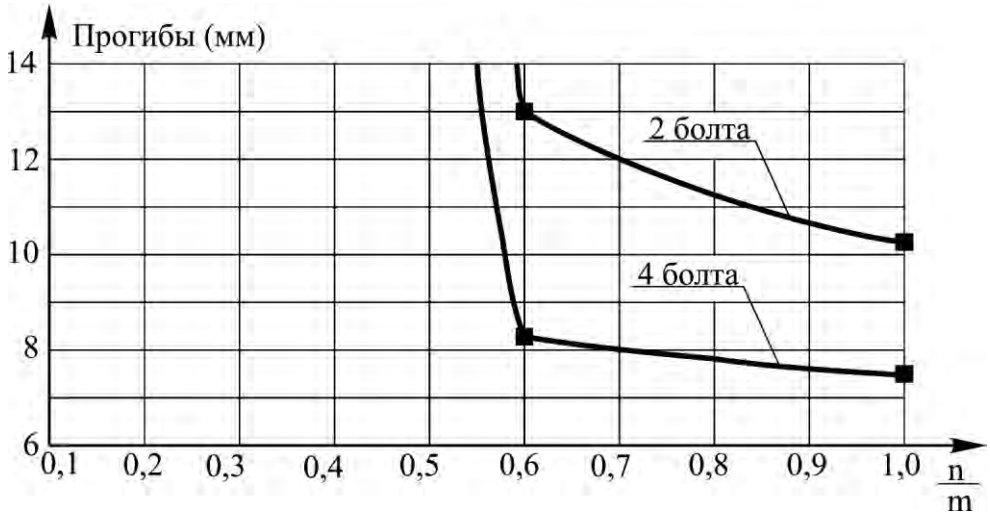


Рисунок 4.32 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне (n - количество опор в контурных узлах по одной стороне конструкции, m - количество контурных узлов по одной стороне)

Для определения частот собственных колебаний СПБ подвергалась динамическим испытаниям по методике, описанной в пункте 4.1.3.

Виброграммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рисунке 4.33 при 4 болтах в узле и на рисунке 4.34 при 2 болтах в узле.

а) б) в)

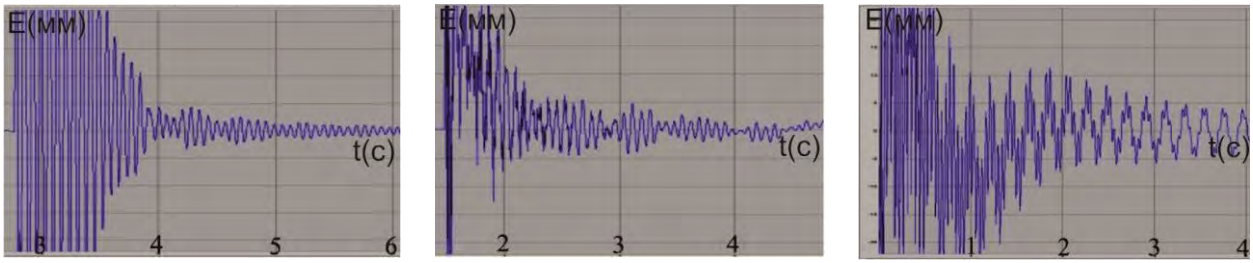


Рисунок 4.33 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ при 4 болтах в узле в зависимости от схемы опирания (а - 5 опор, б – 3 опоры, в – 2 опоры)

а) б) в)

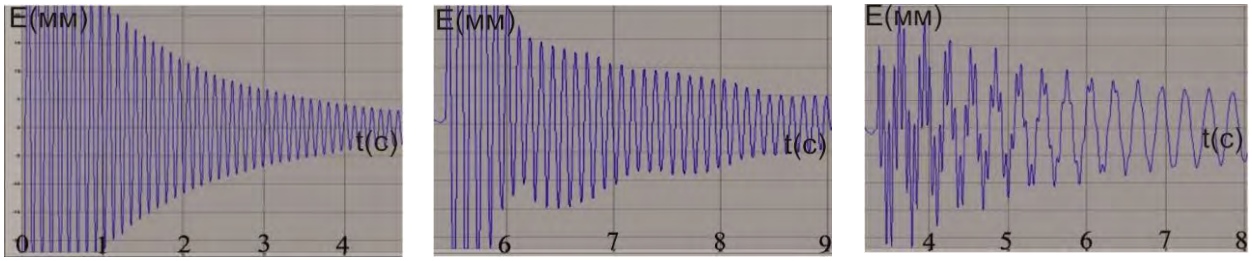


Рисунок 4.34 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ при 2 болтах в узле в зависимости от схемы опирания (а - 5 опор, б – 3 опоры, в – 2 опоры)

Результаты динамических испытаний представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Экспериментальные частоты собственных колебаний СПБ при различной жёсткости крепления узловых соединений, при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4		Кол-во болтов в узле 2	
		Частота, f (c^{-1})	Круговая частота, ω (c^{-1})	Частота, f (c^{-1})	Круговая частота, ω (c^{-1})
Количество опор по одной стороне	5	14,00	87,92	9,00	56,52
	3	13,20	82,87	8,50	53,38
	2	5,60	35,47	3,50	21,98

По данным таблицы 4.15 построен график изменения частот собственных колебаний в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции.

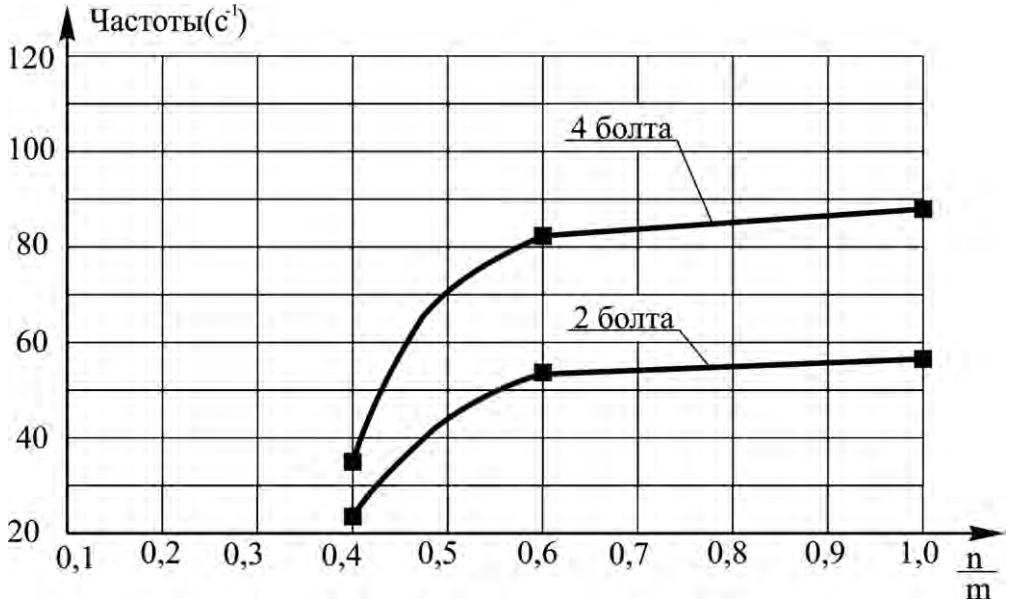


Рисунок 4.35 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне (n - количество опор в контурных узлах по одной стороне конструкции, m - количество контурных узлов по одной стороне)

Полученные результаты экспериментальных и численных исследований представлены в таблице 4.16. Критерием точности является коэффициент К, связывающий частоту собственных поперечных колебаний СПБ ω распределенной массой m и максимальный прогиб W_0 при действии равномерно распределенной нагрузки q в формуле В.И. Коробко (4.5). Этот коэффициент для квадратных пластин с шарнирно опертым контуром составляет К=1,582.

Таблица 4.16 – Сопоставление экспериментальных и теоретических данных для СПБ при различной жёсткости узлов и при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4			Кол-во болтов в узле 2		
		Кол-во опор по одной стороне			Кол-во опор по одной стороне		
		5	3	2	5	3	2
Максимальный прогиб W_o(мм)	Эксперимент	7,49	8,28	18,64	10,21	13,04	-
	Численно	7,35	10,13	14,11	9,44	13,21	33,14
Откл. эксп. от числ. (%)		1,87	18,26	24,30	7,54	1,29	-
Круговая частота, ω (c^{-1})	Эксперимент	87,92	82,87	35,47	56,52	53,38	21,98
	Численно	87,84	72,83	42,61	56,91	47,26	27,79
Откл. эксп. от числ. (%)		0,09	12,14	16,76	0,69	11,47	20,91
К по (4.5)	Эксперимент	1,551	1,524	1,029	1,456	1,659	-
	Численно	1,519	1,439	1,14	1,365	1,317	1,142
Откл. эксп. от числ. (%)		2,06	5,58	9,74	6,25	20,61	-
$K_{теор}$		1,582					
Отклонение К от $K_{теор}$ (%)	Эксперимент	1,98	1,67	34,95	7,97	4,85	-
	Численно	3,98	9,03	27,71	13,72	16,74	27,79

Анализ полученных данных показывает, что при опирании системы во всех контурных узлах экспериментальные прогибы и частоты больше полученных численно. При опирании системы в 3 контурных узлах прогибы меньше, а частоты – выше полученных численно. А при опирании системы только по углам прогибы значительно больше, а частоты меньше полученных экспериментально.

Для СПБ в зависимости от схемы опирания при креплении узла 4 болтами разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,87% до 24%, а разница между частотами составляет от 0,09% до 16,76%. При креплении узла 2 болтами разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,29% до 7,54%, а разница между частотами составляет от 0,69% до 20,91%.

Основной причиной расхождения экспериментальных и численных значений прогибов и частот поперечных колебаний является то обстоятельство, что за счёт высокой степени податливости узлов системы её деформации при высоких уровнях нагрузки проходят в нелинейной области. Для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными достигает 20,61% при опирании конструкции только по углам. Необхо-

димо отметить, что формула (4.5) выведена для изотропных пластин, непрерывно опёртых по контуру, и это обстоятельство приводит к большим ошибкам при определении коэффициента К.

4.3.3 Результаты исследований СПБ с покрытием при изменении жёсткости крепления покрытия к элементам СПБ

Экспериментальная конструкция СПБ с покрытием представлена на рисунке 4.36.

Рисунок 4.36 –СПБ с покрытием с размером ячеек 0,6×0,6 м

На первом этапе выполнены исследования по экспериментальному определению фактической податливости крепления покрытия к элементам СПБ. Для этого численным методом рассчитана экспериментальная конструкция. Жесткость вертикальных конечных элементов изменялась от 0 (в практических расчётах принято $EI_x = 10^{-5}$кН·м^2; $EI_y = 10^{-5}$кН·м^2; $GI_{кр} = 10^{-5}$кН·м^2, EA = 1,1·10^{4}кН) до достаточно большой (EI_x=10^{3}кН·м^2; EI_y=10^{3}кН·м^2; $GI_{кр}$=10^{3}кН·м^2, EA = 1,1·10^{4}кН), при которой изменение прогибов и частот колебаний стабилизировалось. При жёсткости вертикальных элементов, равных 0, покрытие не включается в совместную работу с системой перекрёстных балок, а при очень большой жёсткости вертикальных элементов податливость связей, крепящих элементы покрытия к СПБ, отсутствует. Соотношение жёсткости вставки к жёсткости элемента самой системы перекрёстных балок принято постоянным $EI_{вс}/EI_{эл}$ =0,0033 при креплении узла 4 болтами, и

$EI_{вс}/EI_{эл}$ =0,0013 при креплении узла 2 болтами. По результатам расчёта определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрёстных балок. Результаты исследований СПБ с покрытием размером в плане 2,4×2,4м с размером ячеек 0,6×0,6 м представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Результаты численных исследований системы перекрёстных балок с покрытием размером в плане 2,4×2,4м с размером ячеек 0,6×0,6 м

№ п/п	EI_x; EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)
1	10^3	1,47	174,5430
2	10^2	1,47	174,4683
3	10	1,48	173,7428
4	10^0	1,54	167,8899
5	10^{-1}	1,86	143,6445
6	10^{-2}	2,64	116,1928
7	10^{-3}	3,52	97,2747
8	10^{-4}	4,47	96,6959
9	10^{-5}	4,72	96,4816

По результатам исследования был построен график изменения частот собственных колебаний и прогибов СПБ в зависимости от жёсткости вертикальных элементов, крепящих элементы покрытия к СПБ (рисунок 4.37).

На график были нанесены значения частот колебаний и прогибов, полученные в результате экспериментов при креплении покрытия 4 вертикальными элементами по углам ячейки. Таким образом была определена фактическая жесткость вертикальных элементов, которая составила $EI_x = 9\cdot10^{-4}$ Кн·м^2; $EI_y = 9\cdot10^{-4}$ Кн·м^2; $GI_{кр} = 9\cdot10^{-4}$ Кн·м^2, ЕА = $1{,}1\cdot10^4$Кн. Соответственно увеличение количества гвоздей по одной стороне достигалось введением новых вертикальных элементов.

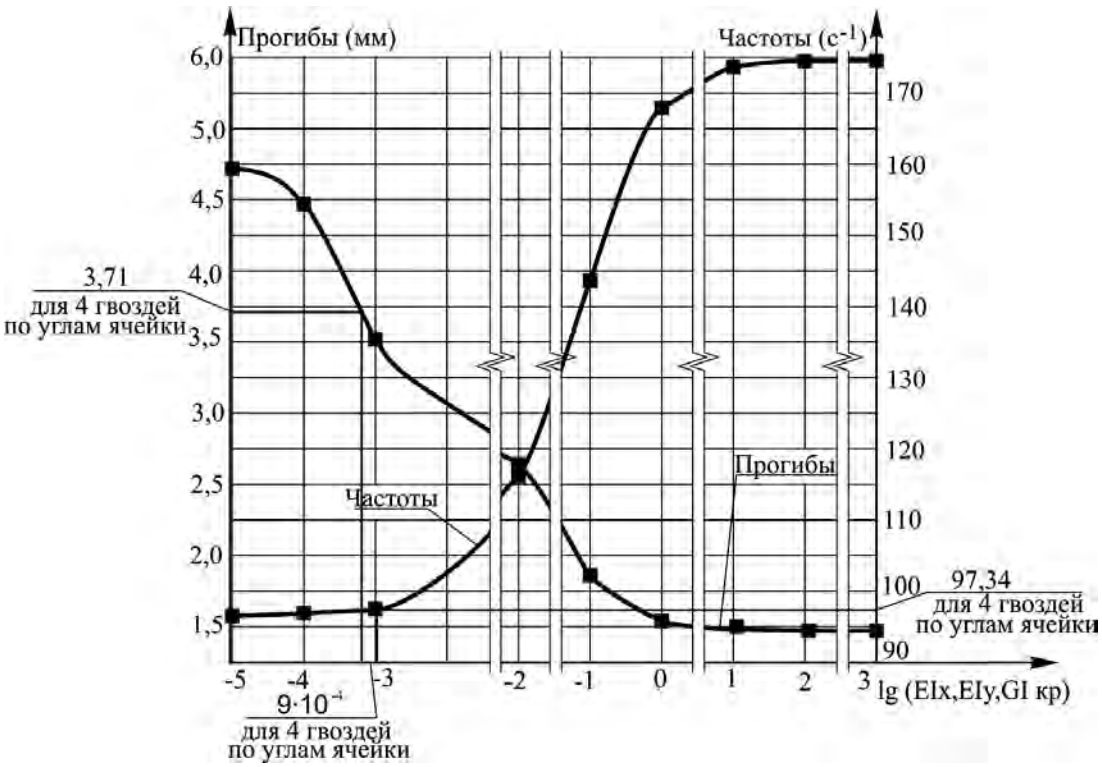


Рисунок 4.37 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов в зависимости от жёсткости вертикальных элементов, крепящих элементы покрытия к СПБ

Результаты экспериментальных исследований СПБ с покрытием размером в плане 2,4×2,4м с размером ячеек 0,6×0,6 м представлены в таблице 4.18. По данным таблицы 4.18 построен график изменения прогибов в зависимости от жёсткости крепления покрытия.

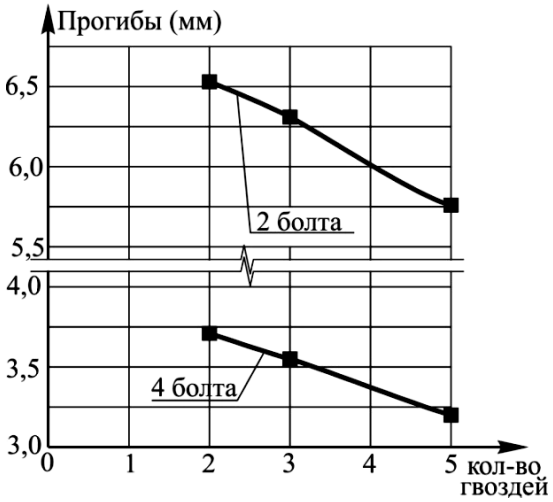
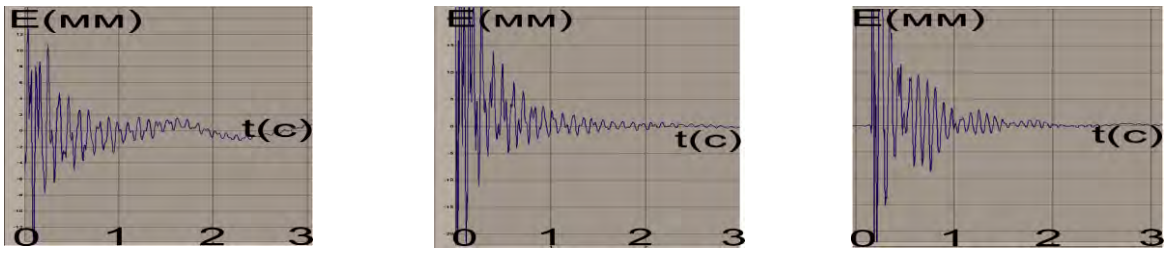


Рисунок 4.38 – Изменение прогибов в зависимости от жёсткости крепления покрытия

Таблица 4.18 – Результаты экспериментального определения максимального прогиба (мм) СПБ при различной жёсткости крепления узловых соединений и жёсткости крепления покрытия

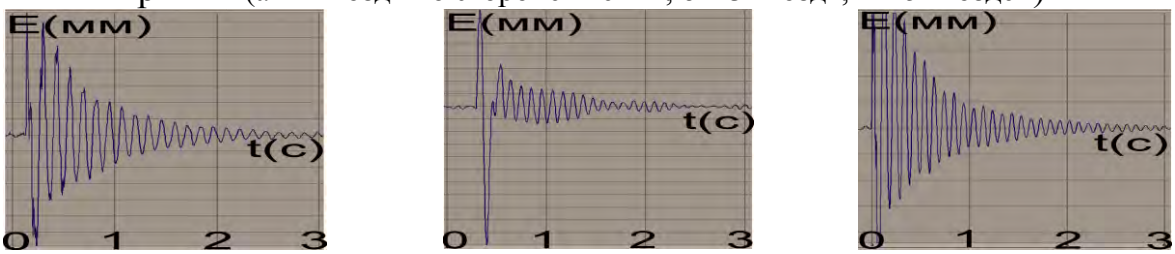
					Максимальный прогиб (мм)			
Нагрузка, (Н/м^2)					0	27,8	55,6	83,4
Количество болтов в узле СПБ 4	Количество гвоздей по одной стороне ячейки	2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1981	2101	2231	2359
				2	1982	2098	2227	2355
				3	1968	2080	2205	2330
			Средний прогиб		0	1,16	2,44	3,71
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2066	2190	2318	2438
				2	2078	2188	2319	2430
				3	2080	2188	2316	2421
			Средний прогиб		0	1,14	2,43	3,55
		5	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2139	2251	2359	2471
				2	2140	2235	2347	2456
				3	2122	2209	2322	2434
			Средний прогиб		0	0,98	2,09	3,20
Количество болтов в узле СПБ 2	Количество гвоздей по одной стороне ячейки	2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1747	1945	2157	2421
				2	1788	1971	2183	2436
				3	1835	2009	2221	2472
			Средний прогиб		0	1,85	3,97	6,53
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1914	2089	2299	2555
				2	2076	2232	2439	2703
				3	2083	2229	2442	2708
			Средний прогиб		0	1,59	3,69	6,31
		5	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2133	2297	2501	2716
				2	2102	2251	2456	2677
				3	2128	2271	2480	2698
			Средний прогиб		0	1,52	3,58	5,76

Виброграммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рисунке 4.39 при 4 болтах в узле и на рисунке 4.40 при 2 болтах в узле.



а) б) в)

Рисунок 4.39 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием при 4 болтах в узле в зависимости от жёсткости крепления покрытия (а –2 гвоздя по стороне ячейки, б – 3 гвоздя, в – 5 гвоздей)



а) б) в)

Рисунок 4.40 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием при 2 болтах в узле в зависимости от жёсткости крепления покрытия (а –2 гвоздя по стороне ячейки, б – 3 гвоздя, в – 5гвоздей)

Результаты динамических испытаний представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Экспериментальные частоты собственных колебаний СПБ при различной жёсткости крепления узловых соединений и жёсткости крепления покрытия

		Кол-во болтов в узле 4		Кол-во болтов в узле 2	
		Частота, f (c^{-1})	Круговая частота, ω (c^{-1})	Частота, f (c^{-1})	Круговая частота, ω (c^{-1})
Количество гвоздей по одной стороне покрытия	2	15,50	97,34	9,80	61,54
	3	15,90	99,85	10,75	67,51
	5	16,10	101,11	11,20	70,34

По данным таблицы 4.19 построен график изменения частот собственных колебаний в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции.

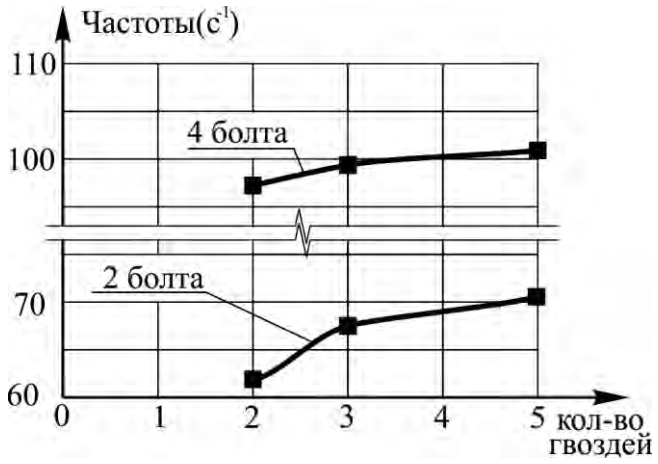


Рисунок 4.41 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от жёсткости крепления покрытия к СПБ

Полученные результаты экспериментальных и численных исследований представлены в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Сопоставление экспериментальных и теоретических данных для СПБ при различной жёсткости крепления узловых соединений и жёсткости крепления покрытия

		Кол-во болтов в узле 4			Кол-во болтов в узле 2		
		Кол-во гвоздей по одной стороне покрытия			Кол-во гвоздей по одной стороне покрытия		
		2	3	5	2	3	5
Максимальный прогиб W_o(мм)	Эксперимент	3,71	3,55	3,2	6,53	6,31	5,76
	Численно	3,65	3,42	3,07	6,38	6,18	5,99
Откл. эксп. от числ. (%)		1,62	3,66	4,06	2,30	2,06	3,84
Круговая частота, ω ($с^{-1}$)	Эксперимент	97,34	99,85	101,11	61,54	67,51	70,34
	Численно	97,20	103,12	111,75	67,69	76,22	78,39
Откл. эксп. от числ. (%)		0,14	3,17	9,52	9,09	11,42	10,27
К по (4.5)	Эксперимент	1,642	1,654	1,529	1,156	1,344	1,331
	Численно	1,539	1,623	1,611	1,305	1,603	1,643
Откл. эксп. от числ. (%)		6,27	1,87	5,09	11,42	16,16	18,99
$К_{теор}$		1,582					
Отклонение К от $К_{теор}$ (%)	Эксперимент	3,82	4,54	3,39	26,90	15,07	15,84
	Численно	2,70	2,55	1,78	17,51	1,28	3,72

Анализ полученных данных показывает, что независимо от податливо-

сти узловых соединений и жёсткости крепления покрытия экспериментальные прогибы больше полученных численным способом, а частоты меньше.

Для СПБ в зависимости от жёсткости крепления покрытия к системе разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,62% до 4,06%, а разница между частотами составляет от 0,14% до 11,42%.

Основной причиной расхождения экспериментальных и численных значений прогибов и частот поперечных колебаний является то обстоятельство, что за счёт высокой степени податливости узлов системы её деформации при высоких уровнях нагрузки проходят в нелинейной области. Для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными несколько выше – до 18,99%.

4.3.4 Результаты исследований СПБ с покрытием при различной схеме опирания

В данном разделе исследуется СПБ с покрытием, прикреплённом 5 гвоздями по каждой стороне ячейки, при различных схемах опирания конструкции.

Результаты экспериментальных исследований СПБ с покрытием при различных схемах опирания представлены в таблице 4.21.

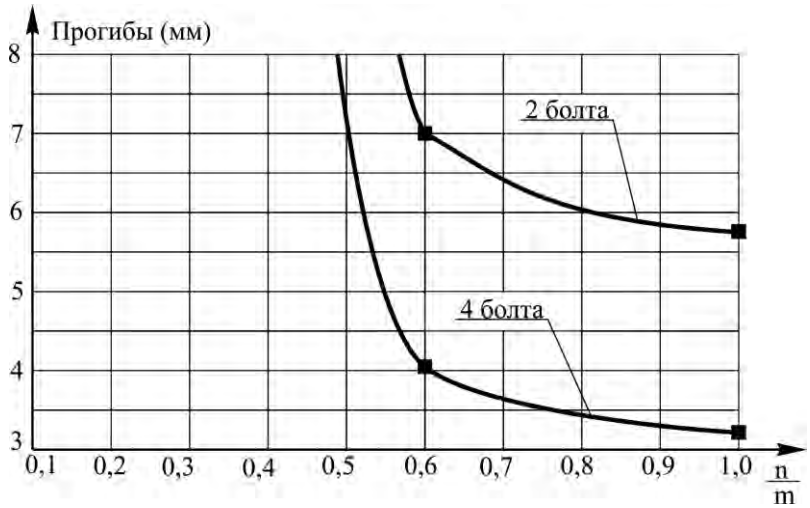


Рисунок 4.42 – Изменение прогибов в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне (n - количество опор в контурных узлах по одной стороне конструкции, m - количество контурных узлов по одной стороне)

Таблица 4.21 – Результаты экспериментальных исследований максимального прогиба (мм) при различном количестве опор по одной стороне СПБ с покрытием

					Максимальный прогиб (мм)			
Нагрузка, (Н/м^2)					0,0	27,80	55,60	83,40
Количество болтов в узле СПБ 4	Количество опор по одной стороне конструкции	5	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2139	2251	2359	2471
				2	2140	2235	2347	2456
				3	2122	2209	2322	2434
			Средний прогиб		0,0	0,98	2,09	3,20
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1826	1988	2125	2250
				2	1881	2031	2163	2285
				3	1905	2049	2182	2304
			Средний прогиб		0,0	1,52	2,86	4,09
		2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1530	2482	3343	-
				2	1595	2528	3383	-
				3	1642	2562	3426	-
			Средний прогиб		0,0	9,35	17,95	-
Количество болтов в узле СПБ 2	Количество опор по одной стороне конструкции	5	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	2133	2297	2501	2716
				2	2102	2251	2456	2677
				3	2128	2271	2480	2698
			Средний прогиб		0,0	1,52	3,58	5,76
		3	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1735	1928	2167	2450
				2	1788	1967	2215	2482
				3	1804	1981	2229	2495
			Средний прогиб		0,0	1,83	4,28	7,00
		2	Показания ИЧ-25 при соответствующем статическом загружении	1	1115	2530	4169	-
				2	1224	2622	4266	-
				3	1290	2677	4314	-
			Средний прогиб		0,0	14,00	30,40	-

Примечание. В ячейках таблицы, где стоят прочерки, система перестаёт работать в упругой стадии, в связи с чем эти результаты в исследованиях не учитывались.

По данным таблицы 4.21 построен график изменения прогибов в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции.

Виброграммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рисунке 4.43 при 4 болтах в узле и на рисунке 4.44 при 2 болтах в узле.

а) б) в)

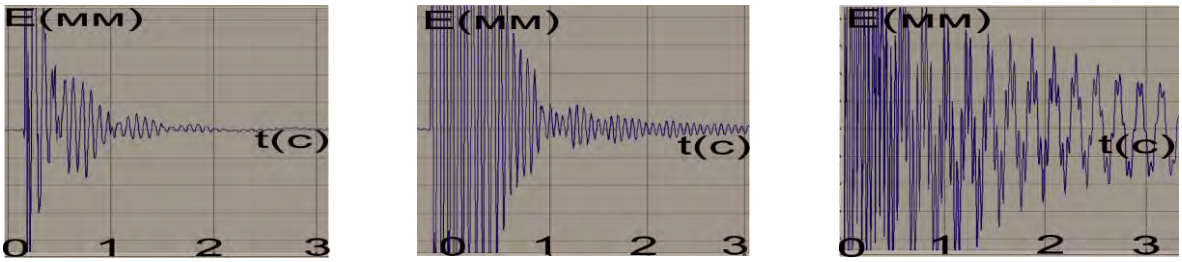


Рисунок 4.43 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием, при 4 болтах в узле, в зависимости от схемы опирания (а - 5 опор, б – 3 опоры, в – 2 опоры)

а) б) в)

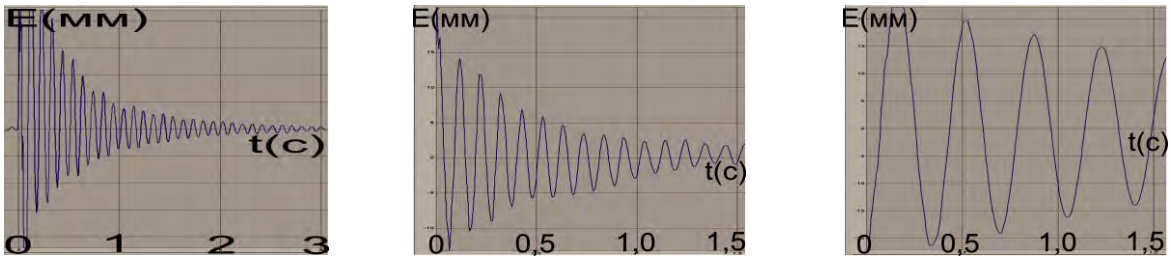


Рисунок 4.44 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием, при 2 болтах в узле, в зависимости от схемы опирания (а - 5 опор, б – 3 опоры, в – 2 опоры)

Результаты динамических испытаний представлены в таблице 4.22.

Таблица 4.22 – Экспериментальные частоты собственных колебаний СПБ с покрытием при различной жёсткости крепления узловых соединений, при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4		Кол-во болтов в узле 2	
		Частота, f ($с^{-1}$)	Круговая частота, ω ($с^{-1}$)	Частота, f ($с^{-1}$)	Круговая частота, ω ($с^{-1}$)
Количество опор по одной стороне	5	16,10	101,11	11,20	70,34
	3	14,20	89,18	10,50	65,94
	2	5,75	36,11	3,70	23,24

По данным таблицы 4.22 построен график изменения частот собственных колебаний в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции.

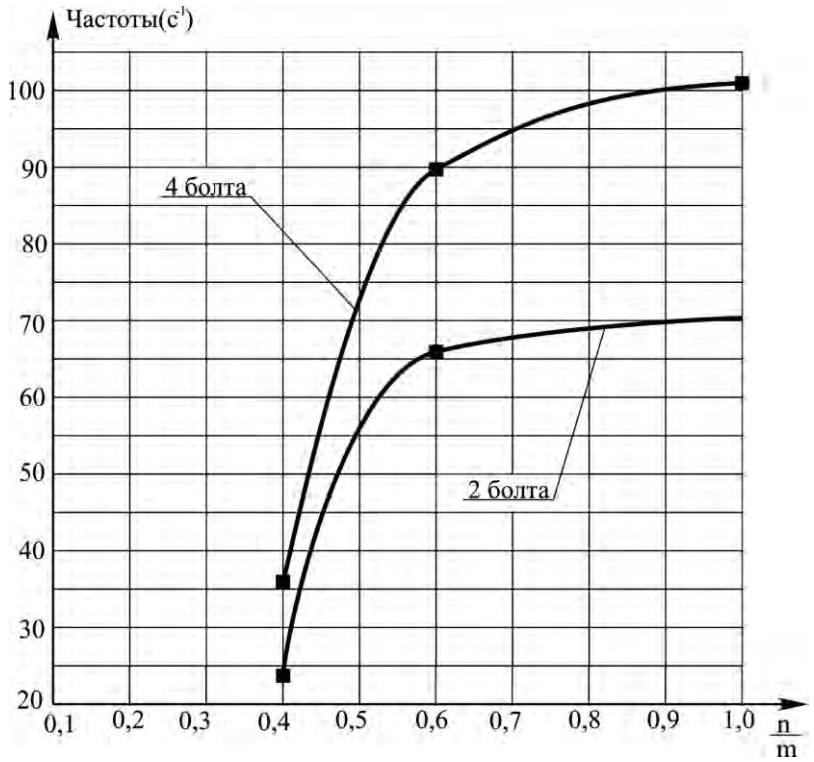


Рисунок 4.45 – Изменение частот собственных колебаний в зависимости от соотношения количества опор по одной стороне конструкции к количеству контурных узлов по одной стороне (n - количество опор в контурных узлах по одной стороне конструкции, m - количество контурных узлов по одной стороне)

Полученные результаты экспериментальных и численных исследований представлены в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Сопоставление экспериментальных и теоретических данных для СПБ с покрытием при различной жёсткости узлов и при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4			Кол-во болтов в узле 2		
		Кол-во опор по одной стороне			Кол-во опор по одной стороне		
		5	3	2	5	3	2
Максимальный прогиб W_o(мм)	Эксперимент	3,2	4,09	17,95	5,76	7	30,4
	Численно	3,07	4,4	18,61	5,99	7,52	30,87
Откл. эксп. от числ. (%)		4,06	7,05	3,55	3,84	6,91	1,52
Круговая частота, ω (c^{-1})	Эксперимент	101,11	89,18	36,11	70,34	65,94	23,24
	Численно	111,75	91,98	37,91	78,39	70,49	24,99
Откл. эксп. от числ. (%)		9,52	3,05	4,75	10,27	6,45	7,00
К по (4.5)	Эксперимент	1,529	1,52	1,693	1,331	1,422	1,15
	Численно	1,611	1,662	1,79	1,643	1,668	1,291
Откл. эксп. от числ. (%)		5,09	8,54	5,42	18,99	14,75	10,92

Продолжение таблицы 4.23

$K_{теор}$		1,582					
Отклонение К от $K_{теор}$ (%)	Эксперимент	3,39	3,94	6,57	15,84	10,11	27,29
	Численно	1,78	4,81	11,64	3,72	5,17	18,38

Анализ полученных данных показывает, что независимо от податливости узловых соединений и схемы опирания, экспериментальные прогибы и частоты меньше полученных численным способом.

Для СПБ в зависимости от схемы опирания, разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,52% до 7,05%, а разница между частотами составляет от 3,05% до 10,27%.

Для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными составила – до 18,99%.

4.4 Выводы по главе 4

1. Разработана программа проведения экспериментальных исследований систем перекрёстных балок на статические и динамические нагрузки. Изготовлен оригинальный стенд для проведения статических и динамических испытаний систем перекрёстных балок, подобраны приборы и оборудование, позволившие с необходимой точностью определить частоты собственных колебаний и максимальный прогиб конструкции.

2. Экспериментальным путем определён кратковременный модуль упругости древесины элементов конструкции.

3. По результатам статических и динамических испытаний определена податливость узловых соединений элементов и жесткость крепления элементов покрытия к конструкции.

4. Экспериментальные данные показывают, что характер изменения частот и прогибов систем перекрёстных балок хорошо согласуется с данными теоретических исследований.

5. Для систем перекрёстных балок с разными размерами ячеек, и при изменении схемы опирания, сопоставление экспериментальных и теоретических данных показывает, что для СПБ с размерами ячеек $a/l < 0,17$ (a – размер ячейки, l – размер в плане системы перекрёстных балок) и соотношением

n/m >0,6 (где n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов по одной стороне) разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 0,97% до 10,63%, а разница между частотами составляет от 0,89% до 7,15%. Для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными достигает 10,76%. При бóльших соотношениях n/m и *a/l* отклонение существенно увеличивается: при *a/l*< 0,17 и n/m <0,6 разница между прогибами достигает 23,72%, частотами – 13,3%, коэффициентом К – 13,24%. При 0,17<*a/l*≤0,25 и n/m >0,6 разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,29% до 18,26%, а разница между частотами составляет от 0,09% до 12,14%, для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными достигает 6,25%, при 17<*a/l*≤0,25 и n/m <0,6 разница между прогибами достигает 24,3%, частотами – 20,91%, коэффициентом К – 20,61%.

6. Для систем перекрёстных балок с разными размерами ячеек с покрытием сверху, при изменении жёсткости крепления покрытия к системе, сопоставление экспериментальных и теоретических данных показывает, что для СПБ с размерами ячеек *a/l* < 0,17 разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,70% до 5,34%, а разница между частотами составляет от 1,12% до 4,11%, для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными достигает 10,19%. При бóльшем соотношении *a/l* отклонение увеличивается при 0,17<*a/l*≤0,25 разница между прогибами достигает 4,06%, частотами – 11,42%, коэффициентом К – 18,99%.

7. Для систем перекрёстных балок с разными размерами ячеек с покрытием сверху и при изменении схемы опирания, сопоставление экспериментальных и теоретических данных показывает, что для СПБ с размерами ячеек *a/l* < 0,17 и соотношением n/m >0,6 разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,7% до 3,31%, а разница между частотами составляет от 1,33% до 4,27%, для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными достигает 11,38%. При бóльших соотношениях n/m и *a/l* отклонение увеличивается при *a/l*< 0,17 и n/m <0,6 разница между прогибами достигает 6,63%, частотами – 4,92%, коэффициентом К – 15,62%. При 0,17<*a/l*≤0,25 и n/m >0,6 разница между

экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 3,84% до 7,05%, а разница между частотами составляет от 3,05% до 10,27%, для коэффициента К разница между теоретическими и экспериментальными данными достигает 18,99%, при $17<a/l\leq 0{,}25$ и $n/m<0{,}6$ разница между прогибами достигает 3,55%, частотами – 7,00%, коэффициентом К – 10,92%.

8. Основной причиной расхождения экспериментальных и численных значений прогибов и частот поперечных колебаний является то обстоятельство, что за счёт высокой степени податливости узлов системы её деформации при высоких уровнях нагрузки проходят в нелинейной области. На основании сопоставления данных численного и экспериментального исследования можно сделать вывод о достаточно хорошей сходимости прогибов и частот собственных колебаний, а также соответствие экспериментального коэффициента К аналитическому значению и его применимость для оценки жёсткости СПБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сформулировать следующие выводы:

1. Выявлена зависимость максимальных прогибов и частот собственных колебаний системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов от податливости узловых соединений, размера ячеек системы, схемы опирания и жёсткости покрытия к элементам СПБ на прямоугольном и треугольном плане.

2. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что для систем перекрёстных балок из деревянных клееных элементов при соотношением сторон в плане $l_1/l_2 \geq 0{,}75$ (l_1 – короткая сторона, l_2– длинная сторона) и размере ячейки $a/l_1 < 0{,}33$(a – размер ячейки), а также при опирании системы перекрёстных балок минимум на три опоры по стороне, произведение их максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределённой нагрузки q на квадрат основной частоты колебаний в ненагруженном состоянии ω есть величина постоянная и соответствует зависимости:

$$W_0\omega^2 = K\frac{q}{m}.$$

3. Установлены пределы применимости функциональной зависимости, приведенной выше, для систем перекрестных балок из деревянных клееных элементов с различными размерами ячеек, податливости узлов, схем опирания и степени включения в работу СПБ покрытия.

4. Разработана и реализована программа проведения экспериментальных исследований систем перекрестных балок на статические и динамические нагрузки. Данные, полученные в ходе эксперимента, подтвердили результаты численных исследований.

5. Разработанные в диссертации динамические методы определения жёсткости узловых соединений элементов, а также установленные пределы применимости фундаментальной закономерности для систем перекрестных балок на податливых связях могут найти широкое применение при проектировании, усилении, обследовании и оценке технического состояния подобных конструкций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ашкенази, Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов [Текст] / Е.К. Ашкенази // Лесн. пром-сть. – 1978. – 224 с.

2. Ашкенази, Е.К. Анизотропия конструкционных материалов [Текст] / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов // Машиностроение: справочник. – Л., 1980. – 247 с.

3. Беккенбах, Э. Неравенства [Текст] / Э. Беккенбах, Р. Беллман. – М.: Мир, 1965. – 276 с.

4. Берковская, Д.А. Клеёные деревянные конструкции в зарубежном строительстве [Текст] / Д.А. Берковская, Л.В. Касабьян. – М.: ЦИНИС, 1977. – 108 с.

5. Блейх, Ф. Уравнения в конечных разностях статики сооружений [Текст] / Ф. Блейх, Е. Мелан; пер. с нем. инж. Г.А. Скуратов; под ред. проф. А.П. Филиппова. – Харьков: Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1936. – 378 с.

6. Большаков, В.В. Развитие деревянных конструкций в СССР [Текст]: Автореферат дис. на соискание учен. степени доктора техн. наук / В.В. Большаков, доц., канд. техн. наук; м-во высш. и сред. спец. образования РСФСР. Моск. ордена Труд. Красного Знамени инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. – М.: [б. и.], 1960. – 54 с.

7. Бубнов, И.Г. Строительная механика корабля: Ч. 1-2 / И. Бубнов. – СПб.: тип. мор. м-ва, 1912–1914. – 2 т.

8. Будаев, В.А. Конструктивные и технологические расчеты в производстве деревянных клеёных конструкций [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 250403.65 "Технология деревообработки" направления подготовки бакалавров 250400.62 и магистров 250400.68 "Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств" / В.А. Будаев, А.А. Колесникова; м-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Поволжский гос. технологический ун-т". – Йошкар-Ола: Поволжский гос. технологический ун-т, 2015. – 115 с.

9. Гвозков, П.А. Оценка жесткости составных деревянных и дерево-металлических балок вибрационным методом: дис. ... канд. техн. наук:

05.23.01 / Гвозков Павел Александрович; [Место защиты: Орлов. гос. техн. ун-т]. – Орел, 2008. – 155 с.

10. Губенко, А.Б. Клееные деревянные конструкции в строительстве [Текст]: Проектирование, расчет и применение / А.Б. Губенко, д-р техн. наук. – М.: Госстройиздат, 1957. – 240 с.

11. Дмитриев, П.А. Облегченные пространственные конструкции с применением древесины [Текст] / П.А. Дмитриев, С.В. Колпаков, А.Г. Кондаков, Ю.Д. Стрижаков // Пром. стр-во. – 1977. – №8. – с. 29-30.

12. Дмитриев, П.А. Крупноразмерные плиты на основе древесины для покрытий зданий [Текст] / П.А. Дмитриев, В.И. Жаданов // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2003. – № 6. – с. 4-10.

13. Иванов, В.Ф. Проблемы долговечности деревянных конструкций [Текст] / В.Ф. Иванов, проф. д-р техн. наук. – Москва; Ленинград: Стройиздат, 1950 (Ленинград: тип. Гизлегпрома). – 136 с.

14. Игнатьев, В.А. Расчет регулярных статически неопределимых стержневых систем [Текст]. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 295 с.

15. Канчели, Н.В. Строительные пространственные конструкции [Текст]: учеб. пособие / Н.В. Канчели – М.: АСВ, 2003. – 112 с.

16. Карлсен, Г.Г. Конструкции из дерева и пластмасс [Текст]: [Учеб. для вузов по спец. "Пром. и гражд. стр-во"] / Ю. В. Слицкоухов, В.Д. Буданов, М.М. Гаппоев и др.; под ред. Г.Г. Карлсена и Ю.В. Слицкоухова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 543 с.

17. Карлсен, Г.Г. Конструкции из дерева и пластмасс [Текст]: [Учеб. для строит. вузов и фак.] / Засл. деят. науки и техники РСФСР, д-р техн. наук, проф. Г.Г. Карлсен, д-ра техн. наук, проф. В.В. Большаков, М.Е. Каган и др.; под ред. засл. деят. науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук, проф. Г.Г. Карлсена. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 688 с.

18. Кондаков, А.Г. Деревостальные структуры с плитами кровли, включенными в пространственную работу покрытия: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Новосибирск, 1985. – 253 с.

19. Коробко, В. И. Закономерности золотой пропорции в строительной механике: Прил. в обл. обследования и испытания сооружений / В.И. Коробко; Ставроп. политехн. ин-т. – Ставрополь: СтПИ, 1991. – 110с.

20. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода [Текст] / В.И. Коробко. – М.: АСВ, 1997. – 396 с.

21. Коробко, В.И. Оценка степени защемления стержней по результатам динамических испытаний [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Турков // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2005. – № 8. – с. 103-105.

22. Коробко, В.И. Применение продольных колебаний для диагностики железобетонных конструкций [Текст] / В.И. Коробко, А.П. Юров // Матер. Всерос. научно-технич. конф. "Диагностика веществ, изделий и устройств". Орел: ОрелГТУ, 1999. – с. 118-120.

23. Коробко, В.И. Интегральная оценка качества предварительно напряженных плит перекрытия вибрационным методом [Текст] / В.И. Коробко, Н.Д. Идрисов, Г.В. Слюсарев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1990. – № 6. – с. 104-106.

24. Коробко, В.И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок [Текст] / В.И. Коробко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – № 11. – с. 32-36.

25. Коротким, Я.И. Изгиб и устойчивость стрежней и стержневых систем [Текст]: (Строит. механика корабля): [Учеб. пособие для кораблестроит. ин-тов] / Я.И. Короткин, А.З. Локшин, Н.П. Сиверская, кандидаты техн. наук. – Москва; Ленинград: Машгиз, [Ленингр. отд-ние], 1953. – 519 с.

26. Крылов, Н.А. Испытание конструкции сооружений [Текст] / Н.А. Крылов, К.А. Глуховский. – Л.: Стройиздат, [Ленингр. отд-ние], 1970. – 269 с.

27. Курдюмов, А.А. К вопросу о расчете перекрытий, подкрепленных несколькими перекрестными связями / А.А. Курдюмов // Сб. трудов ЛКИ. – 1937. – вып. 1.

28. Лабудин, Б.В. Влияние жесткости элементов и податливости узлов на распределение деформаций в перекрестных системах [Текст] / Б.В. Лабудин // Конструкции из клееной древесины и пластмасс: Межвуз. сб. ЛИСИ. – Л., 1983. – с. 56-60.

29. Лабудин , Б.В. К вопросу о расчете перекрестных балок из сборных клееных деревянных элементов с учетом податливости узлов / Б.В. Лабудин

// Конструкции из клееной древесины и пластмасс. Л.: ЛИСИ, 1979. - С. 65-71.

30. Лабудин, Б.В. Пространственные перекрестно-балочные покрытия из клееных деревянных элементов [Текст] / Б.В. Лабудин, Е.И. Светозарова // Исследование конструкций из клееной древесины и пластмасс. – Л.: ЛИСИ, 1977. – № 1(132). – с. 41-47.

31. Лабудин, Б.В. Расчет плитно-ребристых конструкций с упруго-податливыми связями [Текст] / Б.В. Лабудин // Лесной журнал. – 1992. – № 1. – с. 67-72. – (Изв. высш. учеб. заведений).

32. Лабудин, Б.В. Экспериментально-теоретические исследования перекрестных балок из клеевых деревянных элементов [Текст]: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: (05.23.01). – Л.: [б. и.], 1978. – 20 с.

33. Лабудин, Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой [Текст] / А.В. Карельский, Т.П. Журавлева, Б.В. Лабудин // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №2(54). – с. 77-85.

34. Лабудин, Б.В. Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития [Текст] / Б.В. Лабудин, Е.Н. Серов // Изв. вузов. Лесной журнал. – 2013. – №2. – с. 137-146.

35. Лабудин, Б.В. Применение высоких деревоклееных балок в покрытии зданий текстильных цехов [Текст] / С.И. Рощина, М.С. Лисятников, В.И. Мелехов, Б.В. Лабудин, М.В. Лукин // Изв. высш. Учеб. заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 5(365). – с. 267-271.

36. Линьков, Н.В. Соединения деревянных конструкций композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани [Текст]: монография / Н. В. Линьков; м-во образования и науки Российской Федерации. – М.: ФГБОУ ВПО "МГСУ", 2012. – 195 с.

37. Лисятников, М.С. Совершенствование деревокомпозитных балочных конструкций [Текст] / С.В. Рощина, М.В. Лукин, М.С. Лисятников, С.В. Марков, А.В. Синютин, А.И. Голубко // Естественные и технические науки. – 2014. – № 9-10(77). – с. 376-377.

38. Лисятников, М.С. Совершенствование технологии изготовления деревоклееных конструкций с усилением приопорнызх зон [Текст] / М.С. Лисятников // Лесотехнический журнал. – 2015. – т. 5. – № 2(18). – с. 137-148.

39. Лисятников, М.С. Численные исследования высоких деревоклееных балок с усилием опорных зон [Текст] / М.С. Лисятников, М.В. Попова, А.Н. Сергеева, С.А. Сидоров // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – № 5(981). – с. 35-37.

40. Лубо, Л.Н. Плиты регулярной пространственной структуры [Текст] / Л.Н. Лубо, Б.А. Миронков. – Л.: Стройиздат, 1976. – 105 с.

41. Макаров, А.А. Оценка податливости узловых соединений в системах перекрестных балок на квадратном плане [Текст] / А.А. Макаров // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник тезисов Шестнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых; м-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «МГСУ». – М.: МГСУ, 2013.– с. 183-186.

42. Макаров, А.А. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане в зависимости от схемы опирания [Текст] /А.А. Макаров // Материалы IX международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014.– с. 140-142

43. Макаров, А.А. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с пластинами по верхнему поясу с различными размерами ячеек на квадратном плане в зависимости от толщины пластины и размера ячеек [Текст] / А.А. Макаров // Проблемы оптимального проектирования сооружений: Доклады 3-й Всероссийской конференции, Новосибирск, 15-17 апреля, 2014 г. – Новосибирск: НГАСУ, 2014.– с. 248-254.

44. Масленников, А.М. Расчет статистически неопределимых систем в матричной форме [Текст]: [Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений]. – Л.: Стройиздат, [Ленингр. отд-ние], 1970. – 128 с.

45. Мелехов, В.И. Влияние жесткости связей сдвига при расчете ребристых панелей на деревянном каркасе [Текст] / Е.В. Попов, В.В. Филиппов, В.И. Мелехов, Б.В. Лабудин, Т.В. Тюрикова // Лесной журнал – Архангельск, 2016 – №4. – с. 123-134.

46. Минцковский, М.Ш. Перекрестные фермы [Текст] / М.Ш. Минцковский, канд. техн. наук; Акад. архитектуры Укр. ССР. Ин-т строит. техники. – Киев: изд-во и тип. Изд-ва Акад. архитектуры Укр. ССР, 1950. – 144 с.

47. Митинский, А.Н. Упругие постоянные древесины, как трансверсально-изотропного материала [Текст] / А.Н. Митинский // Тр. Ленингр. лесотехн. акад. им. С.М. Кирова. – Л.: ЛТА, 1949. – № 67. – с. 51-68.

48. Морозов, А.П. Пространственные конструкции общественных зданий [Текст] = Space structures of public building / А.П. Морозов, О.В. Василенко, Б.А. Миронков; под ред. А.П. Морозова; Ленингр. зон. науч.-исслед. и проектный ин-т типового и эксперим. проектирования жилых и обществ. зданий. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, [Ленингр. отд-ние], 1977. – 168 с.

49. Нефедов, В. И. Метрология и радиоизмерение [Текст] / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Битюков, В.И. Хахин – М.: Высшая школа, 2006. – 518 с.

50. Папкович, И.Ф. Строительная механика корабля. Ч. 2. Сложный изгиб и устойчивость стержней. Изгиб и устойчивость пластин [Текст]: Утв. ГУУЗом НКСП в качестве учеб. пособия для кораблестр. втузов НКСП / П.Ф. Папкович, проф. Воен.-мор. акад. им. К.Е. Ворошилова и Ленингр. кораблестр. ин-та. – Л.: Судпромгиз, 1941 (Киев). – 960 с.

51. Постнов, В.А. Численные методы расчета судовых конструкций [Текст]: [Учебник для кораблестроит. вузов] / В.А. Постнов. – Л.: Судостроение, 1977. – 279 с.

52. Прилепский, Е.А. Клееные деревянные рамы с нагельными соединениями в карнизном узле [Текст] / Е.А. Прилепский, Б.А. Степанов, Ю.В. Слицкоухов // Передовой опыт в сельском строительстве. – 1982. – №5. – с. 13-14.

53. Применение клееной древесины в пространственных конструкциях покрытий зданий [Текст] / Я.Ф. Хлебной, Л.В. Касабьян, К.П. Пятикрестовский, С.Б. Турковский, Г.В. Кривцова. – М.: Пром. строит., 1977. - №8. – с. 26-29.

54. Пятикрестовский, К.П. Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций [Текст] / К.П. Пятикрестов-

ский; м-во образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО "МГСУ". – М.: МГСУ, 2014. – 317 с.

55. Рабинович, А.Л. Об упругих постоянных и прочности анизотропных материалов [Текст] / А.Л. Рабинович. – М.: Изд-во Бюро новой техники, 1946. – 55 с.

56. Светозарова, Е.И. Клеефанерные оболочки для зданий различных назначений [Текст] / Е.И. Светозарова, А.В. Тюрин // Конструкции из клееной древесины и пластмасс: межвуз. темат. сб. – Л.: ЛИСИ, 1979. – с. 5-12.

57. Светозарова, Е.И. Некоторые вопросы совершенствования клееных деревянных конструкций в процессе изготовления [Текст] / Е.И. Светозарова, Е.Н. Серов, Б.В. Лабудин // Лесн. журн. – Архангельск, 1985. – №2. – с. 65-68. – (Изв.высш.учеб.заведений).

58. Светозарова, Е.И. Определение упругих констант клееной древесины [Текст] / Е.И. Светозарова, А.В. Хапин // Лесн. журнал. – Архангельск, 1982. – №3. – с. 63-66. – (Изв.высш.учеб.заведений).

59. Светозарова, Е.И. Конструкции из клееной древесины и водостойкой фанеры [Текст]: Примеры проектирования: Учеб. пособие для студентов специальности "Пром. и гражд. стр-во" / Е.И. Светозарова, С.А. Душечкин, Е.Н. Серов; м-во высш. и сред. спец. образования РСФСР. Ленингр. инж.-строит. ин-т. – Л.: ЛИСИ, 1974. – 133 с.

60. Светозарова, Е.И. Особенности работы ребристо-кольцевых куполов из деревянных клееных элементов [Текст] / Е.И. Светозарова, Р.Б. Орлович, А.В. Турков // Известия ВУЗ: строительство и архитектура. Вып. 4. – 1990. – с. 16-19.

61. Семенов, К.В. Конструкции из дерева и пластмасс. Деревянные конструкции [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Техносферная безопасность" / К.В. Семенов, М.Ю. Кононова; м-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – 132 с.

62. Системы перекрестных балок. Методика расчета и таблицы. Госстрой СССР. Серия II-30. – М., 1964. – 136 с.

63. Слицкоухов, Ю.В. Метод интегральных оценок при расчете пространственных конструкций из клееной древесины и фанеры [Текст] / Ю.В.

Слицкоухов, К.П. Пятикрестовский, Х.С. Хунагов // Стр-во и архит. – 1986. – №12. – с.6-10. – (Изв. высш. учеб. заведений).

64. Слюсарев, Г.В. Использование нетрадиционных схем закрепления строительных конструкций при вибрационном контроле качества [Текст] / Г.В. Слюсарев, А.П. Юров // Известия ОрелГТУ. Строительство и транспорт. – 2004. – № 1-2. – с. 46-50.

65. Сморчков, А.А. Оценка прогибов изгибаемых элементов из клееной древесины при статистических и циклических нагружениях [Текст] / А.А. Сморчков, Д.А. Орлов, С.А. Кереб // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – №8. – с. 23-24.

66. Сморчков, А.А. Перспективы использования деревянных конструкций составного сечения [Текст] / А.А. Сморчков, А.Н. Гаркавцев, Д.В. Оспищев // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции: в 2 частях. Научный центр «Диспут». 2016. – ООО «Маркер», 2016.– с. 108-110.

67. Сморчков, А.А. Совершенствование методов расчёта элементов из цельной и клееной древесины при режимных нагружениях [Текст] / А.А. Сморчков, И.В. Потапова, Д.А. Сморчков, Д.А. Орлова, А.С. Шевелев // Современные деревянные конструкции. Теория. Практика. Эксперимент. Материалы научно-практической конференции. – Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет(Санкт-Петербург), 2010.– с. 74-78.

68. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия [Текст] / Минстрой России. – М., 1996. – 44 с.

69. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – М.: Стройиздат, 1983. – 31 с.

70. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2-01.07-85* [Текст]. – М.: ОАО ЦПП, 2011. – 80 с.

71. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция [Текст]. – М.: Стройиздат, 2017. – 97 с.

72. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: «Наука», 1966. – 636 с.

73. Тимошенко, С.П. Теория упругости [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер, под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

74. Трофимов, В.И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений: (Разраб. конструкций, исслед., расчет, изготовление, монтаж) [Текст] / В.И. Трофимов, А.М. Каминский; ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, Фирма "Стальстрой". – М.: Наука, 1997. – 591 с.

75. Трофимов, В.И. Структурные конструкции [Текст] / В.И. Трофимов, Г.Б. Бегун. – М.: Стройиздат, 1972. – 272 с.

76. Турков, А.В. Вибрационный способ определения жесткости составной балки переменного сечения [Текст] / А.В. Турков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2007. – №4. – с. 53-55.

77. Турков, А.В. Определение модуля упругости слоя составной балки по динамическим характеристикам конструкции [Текст] /А.В. Турков, П.А. Гвозков // Строительство и реконструкция. – 2011. – №2. – с. 50-52.

78. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с различными размерами ячеек на квадратном плане в зависимости от схемы опирания [Текст] /А.В. Турков, А.А. Макаров // Строительство и реконструкция. – 2013. – №6. – с. 49-52.

79. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на квадратном плане с учетом податливости узловых соединений [Текст] / А.В. Турков, А.А. Макаров // Строительство и реконструкция. – 2013. – №1. – с. 33-36.

80. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане в зависимости от схемы опирания [Текст] / А.В. Турков, А.А. Макаров // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №10. – с. 27-29.

81. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане с пластинами по верхнему поясу [Текст] /А.В. Турков, А.А. Макаров // Строительная наука – 2014: теория, образование, практика, инновации: сборник трудов междунар. научно-техн. конф., г. Архангельск, 22-23 мая 2014г. / ред. колл.: Лабудин Б.В. и др. – Архангельск: Издательство ООО «Типография «Точка», 2014. – с. 265-271.

82. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане с различными размерами ячеек с учётом податливости узловых соединений [Текст] /А.В. Турков, А.А. Макаров // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №2. – с. 22-25.

83. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрёстных балок на треугольном плане с пластинами по верхнему поясу [Текст] / А.В. Турков, А.А. Макаров, Е.С. Волобуева // Строительная наука – XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-арктическому региону: сборник трудов международной научно-технической конференции 28-30 июня 2015г. / м-во образования и науки РФ, Северный (Арктический) Федеральный ун-т им. М.В. Ломоносова, ин-т стр-ва и архитектуры и др.; [отв. ред. Б. В. Лабудин]. – СПб.: Свое изд-во, 2015. – с. 392-401.

84. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с пластинами по верхнему поясу с учётом податливости связей, крепящих элементы покрытия к системе [Текст] / А.В. Турков, А.А. Макаров // Строительство и реконструкция. – 2013. – №5. – с. 30-35.

85. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с различными размерами ячеек на квадратном плане с учетом податливости узловых соединений [Текст] / А.В. Турков, А.А. Макаров // Строительство и реконструкция. – 2013. – №2. – с. 57-61.

86. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрёстных балок с различными размерами ячеек на треугольном плане в зависимости от схемы опирания [Текст] / А.В. Турков, А.А. Макаров, Е.С. Волобуева // Строительство и реконструкция. – 2015. – №2. – с. 46-50.

87. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрёстных балок из деревянных элементов на динамические и статические нагрузки. [Текст] /А.В. Турков, А.А. Макаров // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016. – №3. – с. 275-279.

88. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане с размером ячеек 0,4х0,4 м на динамические и статические нагрузки при изменении податливости связей [Текст] /А.В. Турков, А.А. Макаров, О.А. Ветрова // Строительство и реконструкция. – 2017. – №1. – с. 82-89.

89. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане с размером ячеек 0,4х0,4 м на динамические и статические нагрузки при изменении податливости связей [Текст] / А.В. Турков, А.А. Макаров // Строительство и реконструкция. – 2016. – №6. – с. 51-56.

90. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрёстных балок из деревянных элементов на квадратном плане с размером ячеек 0,4х0,4 м на динамические и статические нагрузки при различной схеме опирания [Текст] / А.В. Турков, А.А. Макаров // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции. – Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – с. 158-165.

91. Турков, А.В. Взаимосвязь задач динамики и статики сплошных и составных деревянных конструкций: дис. ... доктора технических наук: 05.23.01 / Турков Андрей Викторович; [Место защиты: Орлов. гос. техн. ун-т]. – Орел, 2008. – 341 с.

92. Турковский, С.Б. Особенности и перспективы развития большепролётных клеёных деревянных конструкций [Текст] / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – №6. – с. 20-21.

93. Туровский, Л.М. К динамическому расчету плоских и пространственных рам с податливыми узлами [Текст] / Л.М. Туровский // Расчет пространственных конструкций. Вып. 13. – М.: Стройиздат, 1970. – с. 54-62.

94. Файбишенко, В.К. Экспериментально-теоретические исследования перекрестно-ребристых конструкций квадратных в плане при различных вариантах опирания: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Моск. архит. ин-т. Кафедра конструкций пром. зданий. – М.: [б. и.], 1967. – 22 с.

95. Филимонов, Э.В. Конструкции из дерева и пластмасс [Текст] / Э.В. Филимонов, Л.К. Ермоленко, М.М. Гаппоев и др. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – 426 с.

96. Хисамов, Р.И. Конструирование и расчет структурных покрытий [Текст] / Р.И. Хисамов; Казан. хим.-технол. ин-т им. С.М. Кирова, Казан. инж.-строит. ин-т. – Казань: Казан. хим.-технол. ин-т, 1977. – 78 с.

97. Хлебной, Я.Ф. Состояние и основные направления развития деревянных конструкций [Текст] / Я.Ф. Хлебной // Эффект. использование древесины и древесных материалов в современ. стро-ве: Всесоюз. совещ. – М., 1980 . – с. 9-15.

98. Unique building: Lord's media centre. – Chichester (West Sussex): Wiley-acad., 2001. – 144 p.

99. Gatz K.H., Hoor D., Mohler K., Natterer J. Holzbau Atlas. – Munchen, 1978. – 272 p.

100. Herzog, T. Wood Construction Manual / Thomas Herzog, Michael Volz. – Birkhauser Verlag, 2004. – 375 p.

101. Le Ricolais, R. Calkul des tensions et des deformations en flexion plane d'un reseau hexagonal a trois dimensions appuge sur le pourfour. // Genie civil. Paris. – 15 mai 1949.

102. Newman, M. Design and construction of wood framed buildings/ Morton Newman. – McGraw-Hill, Inc, 1995. – 233 p.

103. Thermal and Mechanical Finite Element Modeling of Wood-Floor Assemblies Subjected to Furnace Exposure / Research Report / Machmood Tabaddor, PhD – Underwriters Laboratories Inc, USA, 2008. – 115 p.

104. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Forest Product Laboratory / United States Department of Agriculture Forest Service. – Madison, Wisconsin, USA, 2010. – 509 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица А.1 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	2289,34	2,607101	1,5862	1,582	0,27
2	0,001	238,88	8,071073	1,5863		0,27
3	0,005	56,62	16,57973	1,5866		0,29
4	0,008	39,53	19,84291	1,5866		0,29
5	0,01	33,83	21,44864	1,5865		0,28
6	0,03	18,64	28,89636	1,5866		0,29
7	0,05	15,61	31,58512	1,5874		0,34
8	0,1	13,33	34,17988	1,5875		0,35
9	0,2	12,19	35,74248	1,5875		0,35
10	0,3	11,81	36,31299	1,5875		0,35
11	0,5	11,51	36,78959	1,5880		0,38
12	0,6	11,43	36,9117	1,5875		0,35
13	0,8	11,34	37,0700	1,5885		0,41
14	1	11,28	37,15963	1,5878		0,36

Таблица А.2 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	2963,94	2,246166	1,5243	1,582	3,64
2	0,001	309,35	6,954922	1,5253		3,58
3	0,005	73,38	14,2962	1,5288		3,36
4	0,008	51,26	17,11591	1,5308		3,24
5	0,01	43,89	18,50471	1,5320		3,16
6	0,03	24,22	24,95869	1,5380		2,78
7	0,05	20,29	27,2946	1,5408		2,60
8	0,1	17,34	29,55229	1,5437		2,42
9	0,2	15,87	30,91367	1,5460		2,28
10	0,3	15,38	31,41105	1,5469		2,22
11	0,5	14,98	31,82671	1,5468		2,23
12	0,6	14,88	31,93323	1,5467		2,23
13	0,8	14,76	32,0679	1,5472		2,20
14	1	14,69	32,14952	1,5478		2,16

Таблица А.3 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4562,56	1,809141	1,5222	1,582	3,78
2	0,001	475,49	5,604533	1,5225		3,76
3	0,005	112,2	11,54101	1,5234		3,70
4	0,008	78,14	13,83164	1,5239		3,67
5	0,01	66,79	14,96252	1,5240		3,65
6	0,03	36,51	20,24703	1,5257		3,56
7	0,05	30,46	22,17358	1,5266		3,50
8	0,1	25,92	24,04383	1,5275		3,45
9	0,2	23,65	25,17578	1,5280		3,41
10	0,3	22,89	25,59017	1,5280		3,41
11	0,5	22,29	25,93684	1,5285		3,38
12	0,6	22,13	26,02573	1,5280		3,41
13	0,8	21,94	26,13814	1,5280		3,41
14	1	21,83	26,20629	1,5283		3,39

Таблица А.4 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,6×3,6 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4976,68	1,63704	1,3595	1,582	14,06
2	0,001	519,19	5,073346	1,3622		13,89
3	0,005	122,97	10,46185	1,3720		13,28
4	0,008	85,83	12,54837	1,3777		12,92
5	0,01	73,45	13,58045	1,3809		12,71
6	0,03	40,43	18,42435	1,3990		11,57
7	0,05	33,83	20,20046	1,4072		11,05
8	0,1	28,87	21,83073	1,4025		11,34
9	0,2	26,4	22,98112	1,4213		10,16
10	0,3	25,57	23,36627	1,4231		10,01
11	0,5	24,91	23,68874	1,4249		9,23
12	0,6	24,75	23,77146	1,4257		9,88
13	0,8	24,54	23,8761	1,4260		9,86
14	1	24,42	23,93955	1,4266		9,82

Таблица А.5 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 4,5×4,5 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	6801,68	1,437893	1,433509	1,582	9,39
2	0,001	707,4	4,45927	1,433916		9,36
3	0,005	165,68	9,218868	1,435345		9,27
4	0,008	114,9	11,07361	1,436248		9,21
5	0,01	97,97	11,99423	1,436709		9,18
6	0,03	52,83	16,34976	1,439575		9,00
7	0,05	43,8	17,96381	1,440794		8,83
8	0,1	37,03	19,54655	1,442198		8,84
9	0,2	33,64	20,51278	1,442899		8,79
10	0,3	32,51	20,86815	1,443165		8,78
11	0,5	31,61	21,16615	1,443575		8,75
12	0,6	31,39	21,24267	1,443911		8,73
13	0,8	31,1	21,33949	1,443642		8,75
14	1	30,93	21,39822	1,443664		8,74

Таблица А.6 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	6881,31	1,198217	1,0071	1,582	36,36
2	0,001	717,12	3,72127	1,0123		36,01
3	0,005	169,2	7,733577	1,0316		34,79
4	0,008	117,83	9,317914	1,0429		34,08
5	0,01	100,71	10,11006	1,0493		33,67
6	0,03	55,05	13,92248	1,0877		31,24
7	0,05	45,91	15,36802	1,1053		30,13
8	0,1	39,06	16,80622	1,1246		28,91
9	0,2	35,64	17,69529	1,1376		28,09
10	0,3	34,5	18,02454	1,1426		27,78
11	0,5	33,58	18,3016	1,1465		27,52
12	0,6	33,36	18,37289	1,1479		27,44
13	0,8	33,07	18,46318	1,1492		27,36
14	1	32,9	18,51799	1,1500		27,3

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Принятые в таблицах обозначения: n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов СПБ по одной стороне.

Таблица Б.1 – Результаты численных исследований СПБ размером в плане 18×18 м с размером ячеек 1,5×1,5 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	18,64	28,89636	1,5866	1,582	-0,29
2	0,54	18,66	28,88433	1,5870		-0,31
3	0,38	18,71	28,84413	1,5868		-0,3
4	0,31	18,85	28,74044	1,5872		-0,33
5	0,23	19,87	28,03355	1,5918		-0,61
6	0,15	66,91	12,87257	1,1302		28,56

Таблица Б.2 – Результаты численных исследований СПБ размером в плане 18×18 м с размером ячеек 2,0×2,0 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	24,22	24,95869	1,5380	1,582	2,78
2	0,4	24,46	24,84312	1,5389		2,73
3	0,2	82,17	11,68595	1,1439		27,7

Таблица Б.3 – Результаты численных исследований СПБ размером в плане 18×18 м с размером ячеек 3,0×3,0 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	36,51	20,24703	1,5257	1,582	3,56
2	0,57	36,81	19,7431	1,4626		7,55
3	0,43	38,3	19,4233	1,4729		6,86
4	0,29	108,17	10,11512	1,1282		28,69

Таблица Б.4 – Результаты численных исследований СПБ размером в плане 18×18 м с размером ячеек 3,6×3,6 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	40,43	18,42435	1,3990	1,582	11,57
2	0,33	119,85	9,838626	1,1826		25,25

Таблица Б.5 – Результаты численных исследований СПБ размером в плане 18×18 м с размером ячеек 4,5×4,5 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	52,83	16,34976	1,4396	1,582	9
2	0,6	55,09	16,11185	1,4578		7,85
3	0,4	139,6963	9,273368	1,2246		22,59

Таблица Б.6 – Результаты численных исследований СПБ размером в плане 18×18 м с размером ячеек 6,0×6,0 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	55,05	13,92248	1,0877	1,582	31,24
2	0,5	156,44	8,596837	1,1786		25,5

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица В.1 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4,45	58,97783	1,5779	1,582	0,26
2	0,001	4,3	59,98897	1,5774		0,29
3	0,005	3,87	63,31125	1,5813		0,05
4	0,008	3,67	65,07975	1,5845		-0,16
5	0,01	3,56	66,04323	1,5828		-0,05
6	0,03	3,07	71,28362	1,5902		-0,51
7	0,05	2,89	73,47885	1,5906		-0,51
8	0,1	2,72	75,7469	1,5909		-0,56
9	0,2	2,62	77,18328	1,5910		-0,57
10	0,3	2,59	77,72091	1,5948		-0,81
11	0,5	2,56	78,17546	1,5948		-0,81
12	0,6	2,55	78,29272	1,5934		-0,72
13	0,8	2,54	78,44139	1,5931		-0,7
14	1	2,54	78,53177	1,5968		-0,94

Таблица В.2 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4,35	58,769	1,5315	1,582	3,19
2	0,001	4,26	59,42207	1,5333		3,08
3	0,005	3,98	61,61497	1,5402		2,64
4	0,008	3,83	62,82715	1,5411		2,59
5	0,01	3,76	63,49965	1,5455		2,31
6	0,03	3,36	67,30816	1,5517		1,91
7	0,05	3,21	68,98253	1,5571		1,57
8	0,1	3,06	70,76456	1,5620		1,26
9	0,2	2,97	71,92167	1,5661		1,01
10	0,3	2,94	72,36063	1,5692		0,81
11	0,5	2,91	72,73429	1,5693		0,8
12	0,6	2,9	72,83106	1,5681		0,88
13	0,8	2,89	72,954	1,5679		0,89
14	1	2,89	73,02884	1,5712		0,69

Таблица В.3 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4,71	56,86072	1,5523	1,582	1,88
2	0,001	4,66	57,22229	1,5554		1,68
3	0,005	4,49	58,37091	1,5594		1,43
4	0,008	4,39	59,04165	1,5600		1,39
5	0,01	4,34	59,42499	1,5622		1,25
6	0,03	4,04	61,7574	1,5707		0,71
7	0,05	3,91	62,87899	1,5759		0,39
8	0,1	3,77	64,14644	1,5813		0,04
9	0,2	3,68	65,01408	1,5856		-0,23
10	0,3	3,64	65,35299	1,5848		-0,17
11	0,5	3,61	65,64592	1,5858		-0,24
12	0,6	3,6	65,72246	1,5851		-0,2
13	0,8	3,59	65,8201	1,5854		-0,22
14	1	3,59	65,87977	1,5883		-0,4

Таблица В.4 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,6×3,6 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4,5	56,0438	1,4408	1,582	8,93
2	0,001	4,47	56,29856	1,4442		8,71
3	0,005	4,38	56,99563	1,4504		8,32
4	0,008	4,33	57,4207	1,4553		8,01
5	0,01	4,3	57,67013	1,4578		7,85
6	0,03	4,11	59,29457	1,4730		6,89
7	0,05	4,01	60,1462	1,4787		6,53
8	0,1	3,91	61,17014	1,4914		5,73
9	0,2	3,83	61,912	1,4965		5,4
10	0,3	3,81	62,2115	1,5031		4,99
11	0,5	3,78	62,47493	1,5040		4,93
12	0,6	3,77	62,54447	1,5033		4,97
13	0,8	3,77	62,63362	1,5076		4,7
14	1	3,76	62,68833	1,5062		4,79

Таблица В.5 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 4,5×4,5 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	5,38	52,58527	1,5165	1,582	4,14
2	0,001	5,33	52,84585	1,5173		4,09
3	0,005	5,23	53,43843	1,5224		3,76
4	0,008	5,17	53,80151	1,5255		3,57
5	0,01	5,13	54,0158	1,5258		3,55
6	0,03	4,91	55,43626	1,5382		2,77
7	0,05	4,8	56,20008	1,5454		2,31
8	0,1	4,67	57,13807	1,5542		1,76
9	0,2	4,58	57,83214	1,5615		1,3
10	0,3	4,54	58,11598	1,5631		1,2
11	0,5	4,51	58,36742	1,5662		1,00
12	0,6	4,5	58,43408	1,5663		0,99
13	0,8	4,49	58,51971	1,5674		0,92
14	1	4,48	58,57236	1,5667		0,97

Таблица В.6 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	5,21	48,57944	1,2534	1,582	20,77
2	0,001	5,16	48,83816	1,2546		20,7
3	0,005	5,11	49,21168	1,2615		20,26
4	0,008	5,08	49,43756	1,2656		20,00
5	0,01	5,06	49,57209	1,2675		19,88
6	0,03	4,95	50,49109	1,2864		18,69
7	0,05	4,89	51,00767	1,2969		18,02
8	0,1	4,82	51,67044	1,3118		17,08
9	0,2	4,76	52,19023	1,3217		16,46
10	0,3	4,74	52,41421	1,3274		16,09
11	0,5	4,72	52,62129	1,3323		15,78
12	0,6	4,71	52,67802	1,3323		15,78
13	0,8	4,7	52,75233	1,3333		15,72
14	1	4,7	52,79893	1,3356		15,57

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОДАТЛИВОСТИ СВЯЗЕЙ, КРЕПЯЩИХ ЭЛЕМЕНТЫ ПОКРЫТИЯ К ЭЛЕМЕНТАМ СПБ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица Г.1 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	3,07	71,28362	1,5902	1,582	-0,52
2	10^{7}	3,07	71,27216	1,5897		-0,48
3	10^{5}	3,15	70,30502	1,5871		-0,32
4	10^{4}	3,65	65,15239	1,5794		0,17
5	$6\cdot10^{3}$	3,92	62,82969	1,5774		0,29
6	$3\cdot10^{3}$	4,44	59,07685	1,5796		0,15
7	10^{3}	5,58	52,69958	1,5797		0,14
8	$5\cdot10^{2}$	6,41	49,1974	1,5815		0,03
9	10^{2}	7,95	44,23564	1,5858		-0,24
10	10	9,01	41,60558	1,5899		-0,5
11	10^{-1}	9,39	40,78927	1,5925		-0,67
12	10^{-4}	9,4	40,77817	1,5934		-0,72

Таблица Г.2 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	3,36	67,30816	1,5517	1,582	1,92
2	10^{7}	3,37	67,29479	1,5557		1,66
3	10^{5}	3,48	66,15969	1,5528		1,85
4	10^{4}	4,17	60,22545	1,5418		2,54
5	$6\cdot10^{3}$	4,56	57,59379	1,5419		2,54
6	$3\cdot10^{3}$	5,29	53,4197	1,5388		2,73
7	10^{3}	6,96	46,60639	1,5411		2,58
8	$5\cdot10^{2}$	8,16	43,05078	1,5416		2,55
9	10^{2}	10,33	38,30636	1,5452		2,33
10	10	11,76	35,97545	1,5515		1,93
11	10^{-1}	12,28	35,2619	1,5565		1,61
12	10^{-4}	12,29	35,25205	1,5569		1,59

Таблица Г.3 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	4,04	61,7574	1,5707	1,582	0,71
2	10^{7}	4,04	61,74205	1,5699		0,76
3	10^{5}	4,21	60,42004	1,5667		0,96
4	10^{4}	5,31	53,56534	1,5531		1,83
5	$6\cdot10^{3}$	5,93	50,60176	1,5478		2,16
6	$3\cdot10^{3}$	7,16	46,01546	1,5454		2,31
7	10^{3}	10,02	38,91813	1,5470		2,21
8	$5\cdot10^{2}$	12,09	35,45822	1,5495		2,05
9	10^{2}	15,68	31,16172	1,5521		1,89
10	10	17,92	29,22419	1,5601		1,38
11	10^{-1}	18,83	28,64297	1,5747		0,46
12	10^{-4}	18,85	28,63469	1,5755		0,41

Таблица Г.4 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,6×3,6 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	4,11	59,29457	1,4730	1,582	6,89
2	10^{7}	4,11	59,28065	1,4723		6,93
3	10^{5}	4,26	58,08322	1,4650		7,39
4	10^{4}	5,3	51,74072	1,4463		8,57
5	$6\cdot10^{3}$	5,91	48,89404	1,4402		8,96
6	$3\cdot10^{3}$	7,16	44,36273	1,4364		9,2
7	10^{3}	10,22	37,10044	1,4340		9,36
8	$5\cdot10^{2}$	12,57	33,45778	1,4344		9,33
9	10^{2}	16,97	28,81969	1,4368		9,18
10	10	19,88	26,69225	1,4438		8,73
11	10^{-1}	21,19	26,04809	1,4656		7,36
12	10^{-4}	21,21	26,03855	1,4659		7,34

Таблица Г.5 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 4,5×4,5 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	4,91	55,43626	1,5382	1,582	2,77
2	10^{7}	4,91	55,42003	1,5373		2,83
3	10^{5}	5,15	54,01037	1,5314		3,2
4	10^{4}	6,76	46,73291	1,5050		4,87
5	$6\cdot10^{3}$	7,71	43,657	1,4979		5,31
6	$3\cdot10^{3}$	9,64	38,99299	1,4941		5,56
7	10^{3}	14,23	32,08872	1,4936		5,59
8	$5\cdot10^{2}$	17,55	28,90817	1,4950		5,5
9	10^{2}	23,2	25,16699	1,4979		5,32
10	10	26,62	23,58194	1,5090		4,61
11	10^{-1}	28,35	23,11782	1,5445		2,37
12	10^{-4}	28,39	23,11091	1,5457		2,29

Таблица Г.6 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	4,95	50,49109	1,2863	1,582	18,69
2	10^{7}	4,95	50,47568	1,2856		18,74
3	10^{5}	5,18	49,13333	1,2747		19,42
4	10^{4}	6,87	42,17921	1,2459		21,25
5	$6\cdot10^{3}$	7,88	39,2569	1,2379		21,75
6	$3\cdot10^{3}$	9,92	34,87187	1,2297		22,27
7	10^{3}	14,7	28,55461	1,2218		22,77
8	$5\cdot10^{2}$	18,04	25,74881	1,2192		22,93
9	10^{2}	23,45	22,56094	1,2167		23,09
10	10	26,6	21,26209	1,2258		22,51
11	10^{-1}	28,78	20,89084	1,2804		19,07
12	10^{-4}	28,86	20,88512	1,2832		18,89

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЁСТКОСТИ ПОКРЫТИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица Д.1 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м, с покрытием сверху, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	6,05	50,75307	1,5886	1,582	-0,42
2	2,5000	4,52	58,71593	1,5885		-0,41
3	8,4375	3,64	65,43438	1,5887		-0,42
4	20,0000	3,07	71,28362	1,5902		0,52
5	39,0625	2,67	76,48064	1,5920		-0,63
6	67,5000	2,37	81,16486	1,5915		-0,6
7	107,1875	2,14	85,43254	1,5922		-0,64
8	160,0000	1,96	89,35321	1,5952		-0,83
9	227,8125	1,81	92,9796	1,5951		-0,83
10	312,5000	1,69	96,35261	1,5994		-1,1
11	415,9375	1,58	99,50481	1,5947		-0,8
12	540,0000	1,49	102,4626	1,5946		-0,79

Таблица Д.2 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м, с покрытием сверху, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	7,12	46,25065	1,5526	1,582	1,86
2	2,5000	5,11	54,607	1,5533		1,82
3	8,4375	4,03	61,46009	1,5518		1,91
4	20,0000	3,36	67,30816	1,5517		1,92
5	39,0625	2,91	72,42322	1,5559		1,65
6	67,5000	2,58	76,97379	1,5582		1,5
7	107,1875	2,33	81,07314	1,5611		1,32
8	160,0000	2,13	84,80194	1,5614		1,3
9	227,8125	1,97	88,22009	1,5629		1,21
10	312,5000	1,84	91,3736	1,5660		1,01
11	415,9375	1,73	94,29873	1,5682		0,88
12	540,0000	1,63	97,02465	1,5642		1,13

Таблица Д.3 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м, с покрытием сверху, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	9,22	40,84358	1,5679	1,582	0,89
2	2,5000	6,3	49,42044	1,5685		0,85
3	8,4375	4,88	56,16625	1,5693		0,8
4	20,0000	4,04	61,7574	1,5707		0,71
5	39,0625	3,49	66,53746	1,5750		0,44
6	67,5000	3,09	70,71014	1,5749		0,45
7	107,1875	2,8	74,40822	1,5803		0,11
8	160,0000	2,57	77,72402	1,5826		-0,04
9	227,8125	2,38	80,7248	1,5810		0,07
10	312,5000	2,23	83,46134	1,5835		-0,09
11	415,9375	2,11	85,97311	1,5898		-0,49
12	540,0000	2	88,29142	1,5893		-0,46

Таблица Д.4 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,6×3,6 м, с покрытием сверху, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	9,57	38,71372	1,4621	1,582	7,57
2	2,5000	6,43	47,27706	1,4650		7,39
3	8,4375	4,96	53,88581	1,4681		7,2
4	20,0000	4,11	59,29457	1,4730		6,89
5	39,0625	3,55	63,8749	1,4765		6,67
6	67,5000	3,15	67,84275	1,4779		6,58
7	107,1875	2,85	71,33692	1,4784		6,55
8	160,0000	2,62	74,45282	1,4805		6,42
9	227,8125	2,44	77,25937	1,4846		6,15
10	312,5000	2,29	79,8082	1,4868		6,02
11	415,9375	2,16	82,13912	1,4855		6,1
12	540,0000	2,06	84,28362	1,4917		5,71

Таблица Д.5 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 4,5×4,5 м, с покрытием сверху, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	11,66	35,89175	1,5312	1,582	3,21
2	2,5000	7,71	44,16014	1,5327		3,12
3	8,4375	5,93	50,40391	1,5357		2,92
4	20,0000	4,91	55,43626	1,5382		2,77
5	39,0625	4,25	59,64664	1,5413		2,57
6	67,5000	3,79	63,2576	1,5460		2,28
7	107,1875	3,44	66,41032	1,5465		2,24
8	160,0000	3,18	69,20087	1,5523		1,88
9	227,8125	2,97	71,69799	1,5563		1,62
10	312,5000	2,79	73,95279	1,5554		1,68
11	415,9375	2,65	76,00442	1,5605		1,36
12	540,0000	2,53	77,88362	1,5644		1,11

Таблица Д.6 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м, с покрытием сверху, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	11,52	32,91813	1,2725	1,582	19,56
2	2,5000	7,67	40,45382	1,2795		19,12
3	8,4375	5,94	46,04325	1,2837		18,86
4	20,0000	4,95	50,49109	1,2864		18,69
5	39,0625	4,31	54,17593	1,2895		18,49
6	67,5000	3,86	57,31121	1,2924		18,31
7	107,1875	3,53	60,03086	1,2967		18,03
8	160,0000	3,27	62,42514	1,2990		17,89
9	227,8125	3,07	64,5581	1,3042		17,55
10	312,5000	2,9	66,47699	1,3063		17,42
11	415,9375	2,75	68,21776	1,3045		17,54
12	540,0000	2,63	69,80845	1,3064		17,42

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица Е.1 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×21м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	922,4785	4,105256	1,5848	1,582	-0,18
2	0,001	96,28004	12,70733	1,5848		-0,18
3	0,005	22,84017	26,09079	1,5849		-0,18
4	0,008	15,95518	31,21722	1,5850		-0,19
5	0,01	13,66018	33,73816	1,5850		-0,19
6	0,03	7,540197	45,41341	1,5852		-0,20
7	0,05	6,316195	49,62024	1,5852		-0,21
8	0,1	5,3982	53,67522	1,5854		-0,21
9	0,2	4,939203	56,1148	1,5854		-0,22
10	0,3	4,786207	57,00499	1,5854		-0,22
11	0,5	4,663821	57,74842	1,5855		-0,22
12	0,6	4,63321	57,93895	1,5855		-0,22
13	0,8	4,594967	58,17967	1,5855		-0,22
14	1	4,572023	58,32553	1,5855		-0,22

Таблица Е.2 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×21м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	2971,027	2,288681	1,5864	1,582	-0,28
2	0,001	310,0217	7,08516	1,5864		-0,28
3	0,005	73,48792	14,55335	1,5866		-0,29
4	0,008	51,31287	17,41695	1,5867		-0,30
5	0,01	43,92118	18,82592	1,5868		-0,30
6	0,03	24,21003	25,35951	1,5871		-0,32
7	0,05	20,2678	27,71755	1,5873		-0,33
8	0,1	17,31112	29,99273	1,5874		-0,34
9	0,2	15,83278	31,36268	1,5875		-0,35
10	0,3	15,34	31,86281	1,5875		-0,35
11	0,5	14,94579	32,28059	1,5876		-0,35
12	0,6	14,84724	32,38764	1,5876		-0,35
13	0,8	14,72404	32,52295	1,5876		-0,35
14	1	14,65012	32,60496	1,5876		-0,35

Таблица Е.3 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×21м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	5771,416	1,595555	1,4977	1,582	5,33
2	0,001	601,6897	4,942503	1,4983		5,29
3	0,005	142,5312	10,17506	1,5042		4,92
4	0,008	99,48469	12,19275	1,5076		4,70
5	0,01	85,13574	13,18854	1,5095		4,58
6	0,03	46,87096	17,83809	1,5203		3,90
7	0,05	39,21757	19,53144	1,5250		3,60
8	0,1	33,47725	21,17432	1,5300		3,29
9	0,2	30,60693	22,16817	1,5332		3,08
10	0,3	29,65012	22,53192	1,5345		3,01
11	0,5	28,88466	22,83617	1,5355		2,94
12	0,6	28,6933	22,91418	1,5357		2,92
13	0,8	28,45409	23,01283	1,5361		2,90
14	1	28,31056	23,07263	1,5362		2,89

Таблица Е.4 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×24м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	1077,965	3,795923	1,5833	1,580	-0,21
2	0,001	112,5083	11,74981	1,5834		-0,21
3	0,005	26,68988	24,12471	1,5834		-0,22
4	0,008	18,6444	28,86478	1,5835		-0,22
5	0,01	15,96258	31,19571	1,5835		-0,22
6	0,03	8,81104	41,99085	1,5837		-0,23
7	0,05	7,380726	45,88051	1,5838		-0,24
8	0,1	6,308	49,62972	1,5838		-0,24
9	0,2	5,771637	51,88532	1,5839		-0,24
10	0,3	5,592854	52,70838	1,5839		-0,25
11	0,5	5,449841	53,39573	1,5839		-0,25
12	0,6	5,414069	53,5719	1,5839		-0,25
13	0,8	5,36938	53,79446	1,5839		-0,25
14	1	5,34257	53,92932	1,5839		-0,25

Таблица Е.5 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×24м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	3464,733	2,116294	1,5818	1,580	-0,11
2	0,001	361,5404	6,551479	1,5819		-0,12
3	0,005	85,70106	13,45702	1,5820		-0,13
4	0,008	59,84112	16,10482	1,5821		-0,13
5	0,01	51,22113	17,4076	1,5822		-0,14
6	0,03	28,2345	23,44859	1,5825		-0,16
7	0,05	23,63717	25,62877	1,5826		-0,17
8	0,1	20,18917	27,73231	1,5828		-0,18
9	0,2	18,46517	28,99888	1,5829		-0,18
10	0,3	17,8905	29,46127	1,5829		-0,18
11	0,5	17,43079	29,84752	1,5829		-0,19
12	0,6	17,31585	29,94649	1,5829		-0,19
13	0,8	17,17218	30,07159	1,5830		-0,19
14	1	17,08597	30,14741	1,5830		-0,19

Таблица Е.6 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×24м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4555,418	1,824101	1,5451	1,580	2,21
2	0,001	475,4919	5,647824	1,5461		2,15
3	0,005	112,8319	11,60751	1,5497		1,92
4	0,008	78,83259	13,8959	1,5517		1,79
5	0,01	67,4995	15,02227	1,5528		1,72
6	0,03	37,27805	20,25682	1,5592		1,31
7	0,05	31,23382	22,15011	1,5621		1,13
8	0,1	26,70067	23,97934	1,5650		0,95
9	0,2	24,43412	25,08202	1,5669		0,83
10	0,3	23,67859	25,48482	1,5677		0,78
11	0,5	23,07418	25,82142	1,5683		0,74
12	0,6	22,92308	25,90768	1,5684		0,73
13	0,8	22,7342	26,01672	1,5686		0,72
14	1	22,62089	26,08281	1,5687		0,71

Таблица Е.7 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×24м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	6805,286	1,48652	1,5329	1,580	2,98
2	0,001	709,2892	4,604784	1,5331		2,97
3	0,005	167,4223	9,480098	1,5338		2,92
4	0,008	116,622	11,36016	1,5342		2,90
5	0,01	99,68849	12,28806	1,5344		2,89
6	0,03	54,53183	16,62111	1,5357		2,80
7	0,05	45,50017	18,19943	1,5362		2,77
8	0,1	38,72635	19,73087	1,5368		2,73
9	0,2	35,3402	20,6574	1,5373		2,70
10	0,3	34,21145	20,99653	1,5374		2,69
11	0,5	33,30844	21,2802	1,5376		2,69
12	0,6	33,08269	21,35293	1,5376		2,68
13	0,8	32,80049	21,44491	1,5377		2,68
14	1	32,63117	21,50066	1,5377		2,68

Таблица Е.8 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×24м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	12153,97	0,981228	1,1929	1,580	24,50
2	0,001	1267,928	3,046287	1,1994		24,09
3	0,005	300,3015	6,322577	1,2237		22,55
4	0,008	209,5975	7,612105	1,2380		21,64
5	0,01	179,3659	8,255723	1,2462		21,13
6	0,03	98,77267	11,34073	1,2949		18,04
7	0,05	82,66552	12,50428	1,3176		16,61
8	0,1	70,59209	13,65815	1,3423		15,04
9	0,2	64,55897	14,36947	1,3588		14,00
10	0,3	62,54866	14,6325	1,3652		13,60
11	0,5	60,94072	14,85367	1,3706		13,25
12	0,6	60,53878	14,91055	1,3720		13,16
13	0,8	60,03639	14,98258	1,3739		13,05
14	1	59,73497	15,0263	1,3749		12,98

Таблица Е.9 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×27м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	1176,42	3,620344	1,5718	1,577	0,33
2	0,001	122,7838	11,20634	1,5718		0,33
3	0,005	29,12725	23,009	1,5719		0,32
4	0,008	20,34694	27,52994	1,5720		0,32
5	0,01	17,42018	29,75312	1,5720		0,32
6	0,03	9,615462	40,04947	1,5722		0,31
7	0,05	8,054511	43,75948	1,5722		0,30
8	0,1	6,883809	47,33558	1,5723		0,30
9	0,2	6,298457	49,48707	1,5723		0,29
10	0,3	6,103346	50,27213	1,5724		0,29
11	0,5	5,947272	50,92776	1,5724		0,29
12	0,6	5,908231	51,0958	1,5724		0,29
13	0,8	5,85946	51,3081	1,5724		0,29
14	1	5,830204	51,43671	1,5724		0,29

Таблица Е.10 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×27м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	3788,372	2,018314	1,5731	1,577	0,25
2	0,001	395,3088	6,248179	1,5732		0,24
3	0,005	93,70316	12,83419	1,5733		0,23
4	0,008	65,42762	15,35955	1,5734		0,23
5	0,01	56,00244	16,6021	1,5735		0,22
6	0,03	30,86862	22,36407	1,5738		0,20
7	0,05	25,84185	24,44366	1,5739		0,19
8	0,1	22,07176	26,4502	1,5741		0,19
9	0,2	20,18673	27,65839	1,5742		0,18
10	0,3	19,55837	28,09947	1,5742		0,18
11	0,5	19,05572	28,46793	1,5742		0,18
12	0,6	18,93004	28,56233	1,5742		0,18
13	0,8	18,77295	28,68168	1,5742		0,17
14	1	18,67869	28,75401	1,5743		0,17

Таблица Е.11 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×27м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	3788,372	2,018314	1,5731	1,577	0,25
2	0,001	395,3088	6,248179	1,5732		0,24
3	0,005	93,70316	12,83419	1,5733		0,23
4	0,008	65,42762	15,35955	1,5734		0,23
5	0,01	56,00244	16,6021	1,5735		0,22
6	0,03	30,86862	22,36407	1,5738		0,20
7	0,05	25,84185	24,44366	1,5739		0,19
8	0,1	22,07176	26,4502	1,5741		0,19
9	0,2	20,18673	27,65839	1,5742		0,18
10	0,3	19,55837	28,09947	1,5742		0,18
11	0,5	19,05572	28,46793	1,5742		0,18
12	0,6	18,93004	28,56233	1,5742		0,18
13	0,8	18,77295	28,68168	1,5742		0,17
14	1	18,67869	28,75401	1,5742		0,17

Таблица Е.12 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 4,5×4,5 м с размером в плане 18×27м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	11480,83	1,117534	1,4616	1,577	7,32
2	0,001	1194,43	3,465135	1,4619		7,30
3	0,005	280,0806	7,159003	1,4633		7,21
4	0,008	194,359	8,596144	1,4640		7,17
5	0,01	165,7848	9,308867	1,4644		7,14
6	0,03	89,58421	12,67422	1,4669		6,98
7	0,05	74,34289	13,91818	1,4680		6,91
8	0,1	62,9112	15,13615	1,4692		6,83
9	0,2	57,195	15,87873	1,4700		6,78
10	0,3	55,28953	16,15167	1,4703		6,77
11	0,5	53,76513	16,38045	1,4706		6,75
12	0,6	53,38402	16,43919	1,4706		6,75
13	0,8	52,90764	16,5135	1,4707		6,74
14	1	52,62181	16,55857	1,4708		6,74

Таблица Е.13 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×30м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	1238,637	3,515996	1,5609	1,574	0,83
2	0,001	129,2767	10,88337	1,5609		0,83
3	0,005	30,66692	22,34603	1,5610		0,83
4	0,008	21,42224	26,73681	1,5610		0,82
5	0,01	18,34069	28,89601	1,5611		0,82
6	0,03	10,1232	38,89624	1,5612		0,81
7	0,05	8,479696	42,49966	1,5613		0,81
8	0,1	7,24708	45,97307	1,5614		0,80
9	0,2	6,630768	48,06281	1,5614		0,80
10	0,3	6,425339	48,82535	1,5614		0,80
11	0,5	6,261011	49,46216	1,5614		0,80
12	0,6	6,219905	49,62539	1,5614		0,80
13	0,8	6,168553	49,8316	1,5614		0,80
14	1	6,137752	49,95652	1,5614		0,80

Таблица Е.14 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×30м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	3984,814	1,960025	1,5605	1,574	0,86
2	0,001	415,8031	6,067759	1,56054		0,86
3	0,005	98,55767	12,46379	1,56074		0,84
4	0,008	68,8159	14,91641	1,5608		0,84
5	0,01	58,90197	16,1232	1,5609		0,83
6	0,03	32,46483	21,71958	1,5612		0,82
7	0,05	27,1774	23,73954	1,5613		0,81
8	0,1	23,21181	25,68862	1,5614		0,80
9	0,2	21,22903	26,86225	1,5615		0,79
10	0,3	20,56809	27,29072	1,5615		0,79
11	0,5	20,03937	27,64865	1,5616		0,79
12	0,6	19,90718	27,74035	1,5616		0,79
13	0,8	19,74194	27,85629	1,5616		0,79
14	1	19,6428	27,92655	1,5616		0,79

Таблица Е.15 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×30м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	5223,081	1,689159	1,5191	1,574	3,49
2	0,001	545,1666	5,230089	1,5201		3,42
3	0,005	129,3521	10,74951	1,5236		3,20
4	0,008	90,36953	12,86913	1,5256		3,07
5	0,01	77,37535	13,9129	1,5268		3,00
6	0,03	42,72429	18,76205	1,5331		2,60
7	0,05	35,79412	20,51644	1,5358		2,42
8	0,1	30,59651	22,21169	1,5387		2,24
9	0,2	27,99772	23,23371	1,5406		2,12
10	0,3	27,13145	23,60707	1,5413		2,08
11	0,5	26,43844	23,91907	1,5419		2,04
12	0,6	26,26519	23,99902	1,5421		2,03
13	0,8	26,04861	24,10011	1,5422		2,02
14	1	25,9187	24,16136	1,5424		2,01

Таблица Е.16 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×30м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	7556,37	1,400978	1,5118	1,574	3,95
2	0,001	787,4529	4,340087	1,5120		3,94
3	0,005	185,7741	8,937271	1,5126		3,90
4	0,008	129,366	10,71116	1,5129		3,88
5	0,01	110,563	11,58695	1,5131		3,87
6	0,03	60,42002	15,67971	1,5142		3,80
7	0,05	50,39042	17,172	1,5147		3,77
8	0,1	42,86754	18,62086	1,5152		3,74
9	0,2	39,1057	19,49788	1,5155		3,72
10	0,3	37,85166	19,81898	1,5156		3,71
11	0,5	36,84908	20,08761	1,5157		3,70
12	0,6	36,60094	20,15649	1,5158		3,70
13	0,8	36,29077	20,2436	1,5160		3,68
14	1	36,10466	20,29641	1,5161		3,68

Таблица Е.17 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×30м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	13771,47	0,906208	1,1528	1,574	26,76
2	0,001	1436,285	2,813674	1,1591		26,36
3	0,005	339,371	5,842037	1,1807		24,99
4	0,008	237,0518	7,035164	1,1960		24,02
5	0,01	202,792	7,630998	1,2038		23,52
6	0,03	111,4472	10,49081	1,2503		20,56
7	0,05	93,18534	11,57142	1,2719		19,19
8	0,1	79,49332	12,64431	1,2955		17,69
9	0,2	72,6495	13,30641	1,3113		16,69
10	0,3	70,36868	13,55139	1,3173		16,31
11	0,5	68,54421	13,75743	1,3224		15,98
12	0,6	68,08813	13,81043	1,3238		15,90
13	0,8	67,51804	13,87755	1,3255		15,79
14	1	67,17599	13,9183	1,3265		15,72

Таблица Е.18 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×33м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	1270,646	3,451324	1,5429	1,570	1,73
2	0,001	132,617	10,6832	1,5429		1,73
3	0,005	31,45889	21,93518	1,5430		1,72
4	0,008	21,9753	26,24533	1,5430		1,72
5	0,01	18,81412	28,3649	1,5430		1,72
6	0,03	10,38426	38,18177	1,5432		1,71
7	0,05	8,698287	41,7192	1,5433		1,70
8	0,1	7,433817	45,12906	1,5433		1,70
9	0,2	6,801577	47,18059	1,5434		1,70
10	0,3	6,59084	47,92919	1,5434		1,70
11	0,5	6,422265	48,55437	1,5434		1,69
12	0,6	6,380096	48,71462	1,5434		1,69
13	0,8	6,327415	48,91706	1,5434		1,69
14	1	6,295821	49,03969	1,5434		1,69

Таблица Е.19– Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×33м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4092,438	1,923872	1,5441	1,570	1,65
2	0,001	427,0292	5,955862	1,5441		1,65
3	0,005	101,2151	12,23412	1,5443		1,64
4	0,008	70,67006	14,64167	1,5444		1,63
5	0,01	60,48837	15,8263	1,5444		1,63
6	0,03	33,33717	21,32018	1,5447		1,61
7	0,05	27,90693	23,30325	1,5448		1,60
8	0,1	23,83423	25,2168	1,5449		1,60
9	0,2	21,7979	26,36907	1,5450		1,59
10	0,3	21,11911	26,78975	1,5450		1,59
11	0,5	20,57611	27,14117	1,5451		1,59
12	0,6	20,44035	27,23121	1,5451		1,59
13	0,8	20,27065	27,34504	1,5451		1,59
14	1	20,16882	27,41403	1,5451		1,59

Таблица Е.20 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×33м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	7651,255	1,385388	1,4969	1,570	4,65
2	0,001	797,2925	4,291914	1,4971		4,64
3	0,005	188,0499	8,838979	1,4976		4,61
4	0,008	130,9327	10,59398	1,4980		4,59
5	0,01	111,8934	11,46056	1,4981		4,58
6	0,03	61,12013	15,51156	1,4991		4,52
7	0,05	50,96451	16,98922	1,4995		4,49
8	0,1	43,34718	18,42423	1,4999		4,46
9	0,2	39,53921	19,29305	1,5002		4,44
10	0,3	38,27016	19,61118	1,5004		4,43
11	0,5	37,25487	19,87734	1,5005		4,43
12	0,6	37,00105	19,9456	1,5005		4,43
13	0,8	36,68376	20,03191	1,5005		4,42
14	1	36,49338	20,08424	1,5006		4,42

Таблица Е.21 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×36м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	1285,753	3,409713	1,5238	1,566	2,70
2	0,001	134,1931	10,55442	1,5238		2,69
3	0,005	31,83221	21,67086	1,5239		2,69
4	0,008	22,23587	25,92915	1,5239		2,69
5	0,01	19,0371	28,02323	1,5239		2,69
6	0,03	10,50702	37,72218	1,5241		2,68
7	0,05	8,800997	41,2172	1,5241		2,67
8	0,1	7,521494	44,58621	1,5242		2,67
9	0,2	6,881736	46,6132	1,5242		2,67
10	0,3	6,668494	47,35283	1,5242		2,67
11	0,5	6,497914	47,97054	1,5242		2,67
12	0,6	6,455243	48,12887	1,5242		2,67
13	0,8	6,401935	48,3289	1,5243		2,67
14	1	6,369968	48,45006	1,5243		2,67

Таблица Е.22 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×36м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	4139,102	1,900597	1,5241	1,566	2,67
2	0,001	431,8945	5,883828	1,5242		2,67
3	0,005	102,3649	12,08629	1,5243		2,66
4	0,008	71,47159	14,46484	1,5244		2,66
5	0,01	61,17378	15,63522	1,5244		2,66
6	0,03	33,71296	21,0632	1,5247		2,64
7	0,05	28,2208	23,02257	1,5248		2,63
8	0,1	24,10167	24,91331	1,5249		2,62
9	0,2	22,04211	26,05187	1,5250		2,62
10	0,3	21,35558	26,46755	1,5250		2,62
11	0,5	20,80639	26,81479	1,5250		2,62
12	0,6	20,66908	26,90377	1,5250		2,62
13	0,8	20,49745	27,01624	1,5250		2,62
14	1	20,39446	27,08441	1,5250		2,62

Таблица Е.23 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×36м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	5453,651	1,637728	1,4911	1,566	4,78
2	0,001	569,215	5,070907	1,49203		4,72
3	0,005	135,0429	10,42282	1,4955		4,50
4	0,008	94,33938	12,47835	1,4974		4,38
5	0,01	80,77152	13,49062	1,4985		4,31
6	0,03	44,59063	18,19408	1,5046		3,92
7	0,05	37,35447	19,89608	1,5073		3,75
8	0,1	31,82737	21,54087	1,5054		3,87
9	0,2	29,21384	22,53256	1,5120		3,45
10	0,3	28,30932	22,89486	1,5126		3,41
11	0,5	27,58571	23,19763	1,5132		3,37
12	0,6	27,40481	23,27522	1,5134		3,36
13	0,8	27,17867	23,37331	1,5136		3,35
14	1	27,04302	23,43275	1,5137		3,34

Таблица Е.24 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×36м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	7604,583	1,377047	1,4700	1,566	6,13
2	0,001	792,3946	4,266165	1,4701		6,12
3	0,005	186,8653	8,786642	1,4706		6,09
4	0,008	130,0962	10,53172	1,4709		6,07
5	0,01	111,173	11,39349	1,4711		6,06
6	0,03	60,70932	15,42298	1,4721		6,00
7	0,05	50,61564	16,89324	1,4725		5,97
8	0,1	43,04471	18,32132	1,4729		5,95
9	0,2	39,26127	19,18609	1,4732		5,92
10	0,3	38,00508	19,50276	1,4736		5,90
11	0,5	37,00007	19,76771	1,4738		5,89
12	0,6	36,74881	19,83565	1,4739		5,88
13	0,8	36,43473	19,92157	1,4740		5,88
14	1	36,24628	19,97367	1,4740		5,87

Таблица Е.25 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 4,5×4,5 м с размером в плане 18×36м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	12743,87	1,049988	1,4322	1,566	8,54
2	0,001	1325,513	3,256021	1,4325		8,53
3	0,005	310,5457	6,729428	1,4336		8,46
4	0,008	215,3913	8,082029	1,4342		8,42
5	0,01	183,6729	8,753159	1,4345		8,40
6	0,03	99,08809	11,92571	1,4366		8,27
7	0,05	82,1701	13,10016	1,4375		8,21
8	0,1	69,48103	14,25112	1,4385		8,14
9	0,2	63,13621	14,9534	1,4391		8,10
10	0,3	61,02122	15,21163	1,4393		8,09
11	0,5	59,3292	15,42813	1,4395		8,07
12	0,6	58,90619	15,48372	1,4396		8,07
13	0,8	58,37743	15,55406	1,4397		8,07
14	1	58,06017	15,59672	1,4397		8,06

Таблица Е.26– Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×36м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	15146,45	0,876394	1,1859	1,566	24,27
2	0,001	1579,414	2,721399	1,1924		23,86
3	0,005	373,4676	5,652679	1,2164		22,32
4	0,008	260,416	6,808691	1,2306		21,42
5	0,01	222,7338	7,386299	1,2387		20,90
6	0,03	122,2615	10,16206	1,2870		17,82
7	0,05	102,1736	11,2126	1,3094		16,38
8	0,1	87,11166	12,25668	1,3340		14,82
9	0,2	79,58278	12,90156	1,3503		13,77
10	0,3	77,07359	13,14027	1,3566		13,37
11	0,5	75,06642	13,34109	1,3619		13,03
12	0,6	74,56466	13,39275	1,3633		12,94
13	0,8	73,93747	13,45818	1,3651		12,83
14	1	73,56116	13,49791	1,3662		12,76

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Принятые в таблицах обозначения: c – количество опор по короткой стороне конструкции; d – количество опор СПБ по длинной стороне конструкции.

Таблица Ж.1 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×21м с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	19/22	7,540197	45,41341	1,5852	1,582	-0,20
2	10/8	7,545198	45,39744	1,5852		-0,20
3	7/8	7,546164	45,39354	1,5851		-0,19
4	4/4	7,671692	45,02465	1,5853		-0,21
5	3/4	7,762594	44,74119	1,5840		-0,13
6	2/2	34,39141	18,38193	1,1846		25,12

Таблица Ж.2 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×21м с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	13/15	24,21003	25,35951	1,5871	1,582	-0,32
2	7/8	24,22594	25,3504	1,5870		-0,32
3	5/8	24,23733	25,34261	1,5868		-0,30
4	3/3	26,28042	24,40106	1,5951		-0,83
5	2/2	99,59346	10,79827	1,1838		25,17

Таблица Ж.3 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×21м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	7/8	46,87096	17,83809	1,5203	1,582	3,90
2	2/2	155,4031	8,61313	1,1752		7,55

Таблица Ж.4 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×24м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	19/25	8,81104	41,99085	1,5837	1,580	-0,23
2	10/13	8,812695	41,9865	1,5837		-0,23
3	7/9	8,817906	41,97285	1,5836		-0,23
4	4/5	8,896879	41,77462	1,5827		-0,17
5	3/3	10,16329	39,24975	1,5960		-1,01
6	2/2	49,70377	15,62284	1,2366		21,73

Таблица Ж.5 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×24м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	13/17	28,2345	23,44859	1,5825	1,580	-0,16
2	7/9	28,25281	23,44033	1,5824		-0,15
3	4/5	28,46341	23,34884	1,5818		-0,11
4	3/5	28,52667	23,29528	1,5780		0,12
5	3/3	32,02126	22,11929	1,5970		-1,08
6	2/2	146,1093	9,118269	1,2383		21,63

Таблица Ж.6 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×24м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10/13	37,27805	20,25682	1,5593	1,580	1,31
2	10/7	37,33452	20,24185	1,5593		1,31
3	4/5	37,54535	20,18222	1,5589		1,33
4	4/4	38,04356	20,05788	1,5602		1,25
5	4/3	41,50678	19,32454	1,5800		0,00
6	2/2	179,7212	8,196106	1,2307		22,11

Таблица Ж.7 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×24м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	7/9	54,53183	16,62111	1,5357	1,580	2,80
2	4/5	54,87254	16,5711	1,5360		2,79
3	3/3	60,35178	15,90509	1,5563		1,50
4	2/2	233,1353	7,158544	1,2178		22,92

Таблица Ж.8 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×24м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	4/5	98,77267	11,34073	1,2949	1,580	18,04
2	3/4	105,829	11,08761	1,3262		16,06
3	2/2	361,9229	5,77297	1,2295		22,18

Таблица Ж.9 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×27м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	19/28	9,615462	40,04947	1,572153	1,577	0,31
2	7/10	9,62318	40,03197	1,57204		0,31
3	4/10	9,620681	40,02048	1,570729		0,40
4	3/4	10,04103	39,12646	1,566933		0,64
5	2/2	69,32936	13,3355	1,256802		20,30

Таблица Ж.10 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×27м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	13/19	30,86862	22,36407	1,5738	1,577	0,20
2	7/10	30,8892	22,35603	1,5737		0,21
3	5/7	30,95501	22,33042	1,5735		0,22
4	3/4	32,02237	21,92923	1,5698		0,46
5	3/3	37,27657	20,48346	1,5943		-1,10
6	2/2	206,9716	7,735954	1,2626		19,94

Таблица Ж.11 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×27м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	7/10	58,29138	16,0006	1,5213	1,577	3,53
2	4/4	59,96474	15,79001	1,5240		3,36
3	3/4	59,96817	15,77486	1,5212		3,54
4	2/2	340,3388	5,980526	1,2409		21,32

Таблица Ж.12 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 4,5×4,5 м с размером в плане 18×27м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	5/7	89,58421	12,67422	1,4669	1,577	6,98
2	3/4	91,53173	12,54456	1,4683		6,89
3	3/3	101,3432	12,06225	1,5031		4,69
4	2/2	443,8745	5,206801	1,2267		22,21

Таблица Ж.13 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×30м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	19/31	10,1232	38,89624	1,5612	1,574	0,81
2	10/16	10,12525	38,892	1,5612		0,81
3	7/11	10,13161	38,87883	1,5611		0,82
4	4/6	10,21989	38,69617	1,5600		0,89
5	3/3	13,54884	33,80726	1,5785		-0,29
6	2/2	95,20208	11,42165	1,2660		19,57

Таблица Ж.14 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×30м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	13/21	32,46483	21,71958	1,5612	1,574	0,82
2	7/11	32,48724	21,71159	1,5611		0,82
3	5/11	32,4828	21,71083	1,5605		0,84
4	4/6	32,72409	21,62702	1,5602		0,87
5	4/5	33,07335	21,51657	1,5608		0,84
6	3/3	42,31125	19,15791	1,5830		-0,57
7	2/2	286,9661	6,592354	1,2713		19,23

Таблица Ж.15 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×30м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10/16	42,72429	18,76205	1,5331	1,574	2,60
2	4/6	43,02729	18,69262	1,5326		2,63
3	4/4	44,80041	18,32624	1,5338		2,56
4	2/2	360,4922	5,867131	1,2650		19,63

Таблица Ж.16 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×30м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	7/11	60,42002	15,67971	1,5142	1,574	3,80
2	4/6	60,79973	15,62979	1,5140		3,81
3	3/3	75,77658	14,1511	1,5468		1,73
4	2/2	487,282	5,033482	1,2585		20,05

Таблица Ж.17 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×30м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	4/11	111,4472	10,49081	1,250311	1,574	20,56
2	2/3	764,0953	3,945834	1,212708		22,95

Таблица Ж.18 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×33м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	19/34	10,38426	38,18177	1,5432	1,570	1,71
2	10/12	10,39365	38,16452	1,5432		1,71
3	7/12	10,39317	38,16432	1,5431		1,71
4	4/12	10,38564	38,16135	1,5417		1,80
5	4/4	11,29959	36,53213	1,5372		2,09
6	3/4	11,27883	36,49111	1,5310		2,49
7	2/2	128,6948	9,823918	1,2661		19,36

Таблица Ж.19 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×33м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	13/22	33,33717	21,32018	1,5447	1,570	1,61
2	7/12	33,36092	21,31216	1,5446		1,62
3	2/12	33,3552	21,31177	1,5443		1,64
4	4/12	33,34056	21,31078	1,5435		1,69
5	3/3	47,2881	17,99011	1,5601		0,63
6	2/2	391,4645	5,648011	1,2730		18,92

Таблица Ж.20 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×33м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	7/12	61,12013	15,51156	1,4991	1,570	4,52
2	4/12	61,09199	15,51071	1,4982		4,57
3	3/2	581,5982	4,611751	1,2609		19,69
4	2/2	675,9758	4,272008	1,2576		19,90

Таблица Ж.21 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×36м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	19/37	10,50702	37,72218	1,5241	1,566	2,68
2	10/19	10,50929	37,71791	1,5241		2,68
3	7/13	10,51628	37,70469	1,5240		2,68
4	4/10	10,5334	37,67492	1,5241		2,68
5	4/7	10,6094	37,52537	1,5229		2,75
6	4/4	11,74504	35,53101	1,5115		3,48
7	3/3	16,85083	29,70542	1,5157		3,21
8	2/2	172,1002	8,495464	1,2662		19,15

Таблица Ж.22 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×36м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	13/25	33,71296	21,0632	1,5247	1,566	2,64
2	7/13	33,73767	21,05516	1,5246		2,64
3	5/9	33,81436	21,03004	1,5244		2,65
4	4/7	33,98797	20,97206	1,5238		2,69
5	3/5	34,88252	20,67417	1,5198		2,95
6	3/4	37,09828	19,98029	1,5097		3,60
7	3/3	52,25858	16,91419	1,5240		2,68
8	2/2	526,2563	4,869735	1,2722		18,76

Таблица Ж.23 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×36м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10/19	44,59063	18,19408	1,5046	1,566	3,92
2	4/10	44,64733	18,17719	1,5038		3,97
3	4/7	44,91361	18,12564	1,5042		3,95
4	4/4	48,71706	17,37345	1,4989		4,28
5	2/3	65,73518	13,13689	1,1564		26,15
6	2/2	670,9276	4,30826	1,2694		18,94

Таблица Ж.24 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×36м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	7/13	60,70932	15,42298	1,4720	1,566	6,00
2	4/7	61,1063	15,37168	1,4718		6,01
3	3/5	62,38431	15,20276	1,4698		6,14
4	3/4	66,0074	14,78611	1,4711		6,06
5	3/3	88,14875	12,81258	1,4751		5,80
6	2/3	86,0797	11,5433	1,1692		25,34
7	2/2	925,7282	3,657613	1,2624		19,38

Таблица Ж.25 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 4,5×4,5 м с размером в плане 18×36м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	5/9	99,08809	11,92571	1,4366	1,566	8,27
2	3/5	101,3176	11,80713	1,4398		8,06
3	3/3	135,0089	10,35355	1,4753		5,79
4	2/3	130,5175	10,03601	1,3401		14,43
5	2/2	1252,67	3,122126	1,2447		20,52

Таблица Ж.26 – Результаты численных исследований СПБ размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×36м, с различным количеством опор

№ п/п	c/d	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/c)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	4/7	122,2615	10,16206	1,2870	1,566	17,82
2	4/3	160,5839	9,063848	1,3448		14,13
3	2/2	1528,979	2,82316	1,2422		20,67

ПРИЛОЖЕНИЕ И

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица И.1 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×21м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	6,02	50,66155	1,5750	1,582	0,44
2	0,001	5,67	52,21516	1,5758		0,39
3	0,005	4,76	57,06085	1,5798		0,14
4	0,008	4,38	59,52756	1,5821		-0,01
5	0,01	4,19	60,84512	1,5812		0,05
6	0,03	3,39	67,71969	1,5847		-0,17
7	0,05	3,14	70,46493	1,5893		-0,46
8	0,1	2,91	73,22344	1,5905		-0,54
9	0,2	2,78	74,93173	1,5911		-0,58
10	0,3	2,74	75,56364	1,5948		-0,81
11	0,5	2,7	76,09472	1,5937		-0,74
12	0,6	2,69	76,23142	1,5935		-0,73
13	0,8	2,68	76,40428	1,5948		-0,81
14	1	2,67	76,50925	1,5932		-0,71

Таблица И.2 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×21м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	5,82	51,37842	1,5661	1,582	1,01
2	0,001	5,63	52,25775	1,5673		0,93
3	0,005	5,07	55,16395	1,5727		0,59
4	0,008	4,8	56,71604	1,5739		0,51
5	0,01	4,66	57,5624	1,5740		0,51
6	0,03	4,01	62,16999	1,5799		0,13
7	0,05	3,78	64,1007	1,5832		-0,08
8	0,1	3,56	66,09521	1,5853		-0,21
9	0,2	3,43	67,35813	1,5864		-0,28
10	0,3	3,38	67,83077	1,5853		-0,21
11	0,5	3,35	68,23035	1,5898		-0,49
12	0,6	3,34	68,33343	1,5898		-0,49
13	0,8	3,32	68,46412	1,5863		-0,27
14	1	3,32	68,54356	1,5900		-0,51

Таблица И.3 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×21м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	6,1	49,76493	1,5400	1,582	2,66
2	0,001	6,03	50,07452	1,5413		2,57
3	0,005	5,82	51,07178	1,5474		2,18
4	0,008	5,7	51,65526	1,5504		2,00
5	0,01	5,63	51,98894	1,5512		1,95
6	0,03	5,26	54,02056	1,5647		1,09
7	0,05	5,09	54,99753	1,5694		0,80
8	0,1	4,92	56,1011	1,5785		0,22
9	0,2	4,8	56,85606	1,5817		0,02
10	0,3	4,76	57,1509	1,5848		-0,18
11	0,5	4,72	57,40568	1,5856		-0,23
12	0,6	4,71	57,47224	1,5859		-0,24
13	0,8	4,7	57,55715	1,5872		-0,33
14	1	4,69	57,60903	1,5867		-0,29

Таблица И.4 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×24м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	7,37	45,77861	1,5744	1,580	0,35
2	0,001	6,94	47,21549	1,5771		0,18
3	0,005	5,79	51,73545	1,5797		0,02
4	0,008	5,31	54,04466	1,5810		-0,06
5	0,01	5,08	55,2787	1,5824		-0,15
6	0,03	4,08	61,71623	1,5841		-0,26
7	0,05	3,76	64,28425	1,5839		-0,25
8	0,1	3,48	66,86362	1,5860		-0,38
9	0,2	3,32	68,46017	1,5862		-0,39
10	0,3	3,26	69,05058	1,5845		-0,28
11	0,5	3,22	69,54671	1,5876		-0,48
12	0,6	3,21	69,67444	1,5885		-0,54
13	0,8	3,19	69,8359	1,5859		-0,37
14	1	3,18	69,93396	1,5854		-0,34

Таблица И.5 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×24м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	7,14	46,48695	1,5729	1,580	0,45
2	0,001	6,9	47,30099	1,5737		0,40
3	0,005	6,19	50,00991	1,5781		0,12
4	0,008	5,85	51,46166	1,5793		0,05
5	0,01	5,67	52,25396	1,5782		0,12
6	0,03	4,85	56,56931	1,5821		-0,13
7	0,05	4,56	58,37699	1,5841		-0,26
8	0,1	4,29	60,24347	1,5871		-0,45
9	0,2	4,12	61,42475	1,5846		-0,29
10	0,3	4,07	61,86672	1,5880		-0,50
11	0,5	4,07	61,86672	1,5880		-0,50
12	0,6	4,01	62,33669	1,5884		-0,53
13	0,8	3,99	62,45886	1,5867		-0,42
14	1	3,98	62,53313	1,5865		-0,41

Таблица И.6 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×24м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	7,06	46,44523	1,5525	1,580	1,74
2	0,001	6,91	46,96899	1,5539		1,65
3	0,005	6,43	48,75129	1,5578		1,40
4	0,008	6,19	49,74244	1,5613		1,19
5	0,01	6,06	50,29333	1,5625		1,11
6	0,03	5,4	53,41891	1,5708		0,58
7	0,05	5,15	54,79353	1,5761		0,24
8	0,1	4,9	56,25569	1,5807		-0,05
9	0,2	4,75	57,20441	1,5845		-0,28
10	0,3	4,69	57,56415	1,5842		-0,27
11	0,5	4,64	57,8703	1,5840		-0,25
12	0,6	4,63	57,94958	1,5849		-0,31
13	0,8	4,62	58,05028	1,5870		-0,44
14	1	4,61	58,11158	1,5869		-0,44

Таблица И.7 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×24м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	7,47	45,20306	1,5559	1,580	1,52
2	0,001	7,39	45,48567	1,5586		1,36
3	0,005	7,11	46,41127	1,5611		1,19
4	0,008	6,95	46,95436	1,5620		1,14
5	0,01	6,87	47,26525	1,5645		0,98
6	0,03	6,37	49,16031	1,5693		0,68
7	0,05	6,16	50,07188	1,5743		0,36
8	0,1	5,93	51,10115	1,5785		0,09
9	0,2	5,78	51,80488	1,5812		-0,08
10	0,3	5,72	52,0796	1,5815		-0,09
11	0,5	5,67	52,31695	1,5820		-0,12
12	0,6	5,66	52,37895	1,5829		-0,19
13	0,8	5,64	52,45804	1,5821		-0,13
14	1	5,63	52,50636	1,5822		-0,14

Таблица И.8 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×24м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	9,35	39,14864	1,4608	1,580	7,55
2	0,001	9,28	39,33623	1,4637		7,36
3	0,005	9,19	39,63246	1,4715		6,87
4	0,008	9,14	39,81618	1,4771		6,52
5	0,01	9,11	39,92656	1,4804		6,31
6	0,03	8,92	40,6975	1,5060		4,68
7	0,05	8,82	41,14215	1,5219		3,68
8	0,1	8,69	41,72122	1,5419		2,41
9	0,2	8,59	42,17765	1,5577		1,41
10	0,3	8,55	42,37291	1,5649		0,96
11	0,5	8,52	42,55124	1,5725		0,47
12	0,6	8,51	42,59953	1,5742		0,36
13	0,8	8,5	42,66229	1,5770		0,19
14	1	8,49	42,70133	1,5781		0,12

Таблица И.9 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×27м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	8,53	42,44317	1,5664	1,577	0,67
2	0,001	8,01	43,82214	1,5680		0,57
3	0,005	6,63	48,19318	1,5697		0,46
4	0,008	6,06	50,43245	1,5712		0,37
5	0,01	5,79	51,62928	1,5733		0,24
6	0,03	4,61	57,86793	1,5736		0,21
7	0,05	4,24	60,35323	1,5743		0,17
8	0,1	3,92	62,84743	1,5783		-0,08
9	0,2	3,73	64,39023	1,5764		0,03
10	0,3	3,67	64,96058	1,5787		-0,11
11	0,5	3,61	65,43977	1,5759		0,07
12	0,6	3,6	65,56313	1,5774		-0,03
13	0,8	3,58	65,71904	1,5761		0,05
14	1	3,57	65,81375	1,5763		0,05

Таблица И.10 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×27м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	8,25	43,16159	1,5667	1,577	0,65
2	0,001	7,97	43,94358	1,5688		0,52
3	0,005	7,11	46,56227	1,5713		0,36
4	0,008	6,7	47,96979	1,5716		0,34
5	0,01	6,49	48,73838	1,5715		0,35
6	0,03	5,51	52,92466	1,5733		0,24
7	0,05	5,17	54,6769	1,5755		0,09
8	0,1	4,85	56,48486	1,5774		-0,02
9	0,2	4,66	57,62838	1,5776		-0,04
10	0,3	4,59	58,05607	1,5770		0,00
11	0,5	4,54	58,41754	1,5793		-0,15
12	0,6	4,52	58,51077	1,5774		-0,03
13	0,8	4,5	58,62896	1,5768		0,01
14	1	4,49	58,7008	1,5771		-0,01

Таблица И.11 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×27м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	8,53	42,115	1,5422	1,577	2,20
2	0,001	8,43	42,38314	1,5436		2,12
3	0,005	8,1	43,27547	1,5463		1,95
4	0,008	7,92	43,80052	1,5489		1,78
5	0,01	7,82	44,10135	1,5504		1,69
6	0,03	7,25	45,93704	1,5595		1,11
7	0,05	7	46,82016	1,5642		0,81
8	0,1	6,73	47,8168	1,5686		0,53
9	0,2	6,55	48,49777	1,5704		0,42
10	0,3	6,49	48,76349	1,5731		0,25
11	0,5	6,43	48,99301	1,5733		0,23
12	0,6	6,42	49,05296	1,5747		0,15
13	0,8	6,4	49,12942	1,5747		0,15
14	1	6,39	49,17316	1,5750		0,13

Таблица И.12 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 4,5×4,5 м с размером в плане 18×27м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	9,61	39,46049	1,5254	1,577	3,27
2	0,001	9,54	39,63919	1,5280		3,11
3	0,005	9,34	40,09207	1,5304		2,96
4	0,008	9,23	40,37144	1,5335		2,76
5	0,01	9,16	40,53658	1,5343		2,71
6	0,03	8,73	41,6329	1,5425		2,19
7	0,05	8,52	42,2219	1,5483		1,82
8	0,1	8,26	42,94345	1,5528		1,54
9	0,2	8,09	43,47571	1,5587		1,16
10	0,3	8,02	43,69291	1,5607		1,03
11	0,5	7,96	43,8851	1,5627		0,91
12	0,6	7,94	43,93601	1,5624		0,93
13	0,8	7,92	44,00139	1,5631		0,88
14	1	7,91	44,04157	1,5640		0,83

Таблица И.13 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×30м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	9,53	40,06506	1,5594	1,574	0,93
2	0,001	8,93	41,41665	1,5615		0,80
3	0,005	7,33	45,72745	1,5624		0,74
4	0,008	6,67	47,93994	1,5626		0,72
5	0,01	6,36	49,12231	1,5644		0,61
6	0,03	5,02	55,27896	1,5637		0,65
7	0,05	4,61	57,72778	1,5660		0,51
8	0,1	4,24	60,18316	1,5655		0,54
9	0,2	4,04	61,70091	1,5678		0,39
10	0,3	3,96	62,26178	1,5648		0,58
11	0,5	3,9	62,73295	1,5645		0,60
12	0,6	3,89	62,85423	1,5666		0,47
13	0,8	3,87	63,00751	1,5661		0,50
14	1	3,86	63,10061	1,5667		0,46

Таблица И.14 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×30м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	9,18	40,8029	1,5580	1,574	1,02
2	0,001	8,85	41,56994	1,5590		0,96
3	0,005	7,85	44,15204	1,5599		0,89
4	0,008	7,39	45,54296	1,5625		0,73
5	0,01	7,15	46,30273	1,5626		0,72
6	0,03	6,03	50,43958	1,5638		0,65
7	0,05	5,64	52,16937	1,5647		0,59
8	0,1	5,28	53,95275	1,5667		0,46
9	0,2	5,06	55,07996	1,5648		0,58
10	0,3	4,99	55,50141	1,5669		0,45
11	0,5	4,93	55,85752	1,5680		0,38
12	0,6	4,91	55,94936	1,5668		0,46
13	0,8	4,89	56,06578	1,5669		0,45
14	1	4,88	56,13655	1,5676		0,41

Таблица И.15 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×30м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	8,99	40,86672	1,5305	1,574	2,76
2	0,001	8,78	41,35818	1,5309		2,74
3	0,005	8,12	43,0548	1,534		2,52
4	0,008	7,79	44,00324	1,5376		2,31
5	0,01	7,61	44,53112	1,5383		2,27
6	0,03	6,72	47,52821	1,5474		1,69
7	0,05	6,38	48,84507	1,5516		1,42
8	0,1	6,04	50,24398	1,5543		1,25
9	0,2	5,84	51,15051	1,5576		1,04
10	0,3	5,76	51,494	1,5569		1,09
11	0,5	5,7	51,78621	1,5582		1,00
12	0,6	5,69	51,86186	1,5601		0,89
13	0,8	5,67	51,95795	1,5603		0,87
14	1	5,65	52,01643	1,5583		1,00

Таблица И.16 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×30м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	9,76	39,93573	1,5867	1,574	-0,81
2	0,001	9,64	40,196	1,5877		-0,87
3	0,005	9,25	41,07421	1,5908		-1,07
4	0,008	9,03	41,59217	1,5924		-1,17
5	0,01	8,9	41,88917	1,5919		-1,14
6	0,03	8,21	43,7028	1,5984		-1,55
7	0,05	7,9	44,57521	1,6001		-1,66
8	0,1	7,58	45,55919	1,6038		-1,89
9	0,2	7,37	46,23106	1,6057		-2,01
10	0,3	7,29	46,49311	1,6063		-2,05
11	0,5	7,22	46,7194	1,6064		-2,06
12	0,6	7,21	46,7785	1,6083		-2,18
13	0,8	7,18	46,85387	1,6067		-2,08
14	1	7,17	46,89991	1,6077		-2,14

Таблица И.17 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×30м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	10,99	34,86102	1,3615	1,574	13,50
2	0,001	10,91	35,02237	1,3641		13,34
3	0,005	10,79	35,3047	1,3709		12,90
4	0,008	10,72	35,48244	1,3758		12,59
5	0,01	10,68	35,58971	1,3790		12,39
6	0,03	10,41	36,34624	1,4018		10,94
7	0,05	10,26	36,78696	1,4154		10,08
8	0,1	10,07	37,3637	1,4330		8,96
9	0,2	9,93	37,81862	1,4477		8,02
10	0,3	9,87	38,01256	1,4538		7,64
11	0,5	9,82	38,1888	1,4599		7,25
12	0,6	9,81	38,2363	1,4620		7,11
13	0,8	9,79	38,29785	1,4637		7,01
14	1	9,78	38,336	1,4652		6,92

Таблица И.18 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×33м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	10,35	38,3106	1,5485	1,570	1,37
2	0,001	9,67	39,65096	1,5498		1,29
3	0,005	7,87	43,94641	1,5494		1,31
4	0,008	7,14	46,15348	1,5504		1,25
5	0,01	6,79	47,33263	1,5507		1,23
6	0,03	5,32	53,46515	1,5502		1,26
7	0,05	4,87	55,90054	1,5513		1,19
8	0,1	4,47	58,34037	1,5509		1,22
9	0,2	4,25	59,84751	1,5517		1,16
10	0,3	4,17	60,40429	1,5510		1,21
11	0,5	4,11	60,87194	1,5524		1,12
12	0,6	4,09	60,99231	1,5510		1,21
13	0,8	4,07	61,14442	1,5511		1,20
14	1	4,06	61,23681	1,5520		1,15

Таблица И.19 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×33м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	9,95	39,07093	1,5483	1,570	1,38
2	0,001	9,57	39,83202	1,5478		1,42
3	0,005	8,46	42,4047	1,5507		1,23
4	0,008	7,93	43,7927	1,5503		1,26
5	0,01	7,66	44,55098	1,5498		1,29
6	0,03	6,42	48,67749	1,5507		1,23
7	0,05	5,99	50,40105	1,5511		1,20
8	0,1	5,59	52,17661	1,5513		1,19
9	0,2	5,36	53,29815	1,5521		1,14
10	0,3	5,28	53,71733	1,5531		1,08
11	0,5	5,21	54,07147	1,5528		1,10
12	0,6	5,19	54,16279	1,5520		1,14
13	0,8	5,17	54,27855	1,5527		1,10
14	1	5,16	54,34891	1,5537		1,04

Таблица И.20 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×33м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	10,19	38,34476	1,5273	1,570	2,72
2	0,001	10,06	38,60077	1,5280		2,68
3	0,005	9,64	39,47453	1,5312		2,47
4	0,008	9,4	39,99084	1,5324		2,39
5	0,01	9,27	40,28706	1,5337		2,31
6	0,03	8,52	42,09676	1,5391		1,97
7	0,05	8,19	42,96705	1,5413		1,83
8	0,1	7,85	43,94805	1,5455		1,56
9	0,2	7,63	44,61743	1,5483		1,38
10	0,3	7,54	44,8784	1,5480		1,40
11	0,5	7,47	45,10372	1,5491		1,33
12	0,6	7,45	45,16255	1,5490		1,34
13	0,8	7,43	45,23757	1,5500		1,28
14	1	7,42	45,28341	1,5510		1,21

Таблица И.21 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,0×1,0 м с размером в плане 18×36м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	11,04	36,97964	1,5390	1,566	1,73
2	0,001	10,28	38,31736	1,5386		1,75
3	0,005	8,31	42,61991	1,5387		1,74
4	0,008	7,5	44,83195	1,5366		1,88
5	0,01	7,12	46,01332	1,5367		1,87
6	0,03	5,54	52,1501	1,5359		1,92
7	0,05	5,06	54,58359	1,5368		1,87
8	0,1	4,64	57,0196	1,5378		1,80
9	0,2	4,4	58,5235	1,5362		1,90
10	0,3	4,31	59,07891	1,5335		2,08
11	0,5	4,25	59,54536	1,5361		1,91
12	0,6	4,23	59,6654	1,5350		1,98
13	0,8	4,21	59,8171	1,5355		1,94
14	1	4,2	59,90924	1,5366		1,88

Таблица И.22– Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 1,5×1,5 м с размером в плане 18×36м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	10,57	37,76276	1,5365	1,566	1,88
2	0,001	10,15	38,52265	1,5354		1,95
3	0,005	8,92	41,09948	1,5359		1,92
4	0,008	8,35	42,49121	1,5368		1,87
5	0,01	8,06	43,25152	1,5370		1,85
6	0,03	6,71	47,38651	1,5359		1,92
7	0,05	6,25	49,11172	1,5367		1,87
8	0,1	5,82	50,8877	1,5363		1,90
9	0,2	5,57	52,00883	1,5358		1,93
10	0,3	5,48	52,42772	1,5354		1,95
11	0,5	5,41	52,78156	1,5364		1,89
12	0,6	5,39	52,8728	1,5360		1,92
13	0,8	5,37	52,98844	1,5370		1,85
14	1	5,36	53,05874	1,5382		1,78

Таблица И.23 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 2,0×2,0 м с размером в плане 18×36м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	10,34	37,90019	1,5140	1,566	3,32
2	0,001	10,08	38,38594	1,5140		3,32
3	0,005	9,27	40,07789	1,5178		3,08
4	0,008	8,86	41,02658	1,5202		2,93
5	0,01	8,64	41,5549	1,5209		2,88
6	0,03	7,54	44,55364	1,52570		2,57
7	0,05	7,13	45,86925	1,5292		2,35
8	0,1	6,73	47,26493	1,5326		2,13
9	0,2	6,49	48,16825	1,5350		1,98
10	0,3	6,4	48,51028	1,5352		1,96
11	0,5	6,33	48,80115	1,5367		1,87
12	0,6	6,31	48,87644	1,5366		1,88
13	0,8	6,29	48,97206	1,5377		1,81
14	1	6,27	49,03025	1,5365		1,89

Таблица И.24 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 3,0×3,0 м с размером в плане 18×36м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	10,8	37,15034	1,5194	1,566	2,97
2	0,001	10,66	37,4041	1,5203		2,92
3	0,005	10,19	38,27829	1,5220		2,81
4	0,008	9,92	38,79559	1,5220		2,81
5	0,01	9,78	39,0925	1,5236		2,71
6	0,03	8,95	40,90691	1,5267		2,51
7	0,05	8,59	41,77915	1,5284		2,40
8	0,1	8,21	42,76178	1,5303		2,28
9	0,2	7,97	43,43185	1,5325		2,14
10	0,3	7,88	43,693	1,5336		2,08
11	0,5	7,8	43,91842	1,5336		2,07
12	0,6	7,78	43,97727	1,5339		2,06
13	0,8	7,76	44,05232	1,5351		1,97
14	1	7,74	44,09816	1,5343		2,02

Таблица И.25 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 4,5×4,5 м с размером в плане 18×36м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	11,97	35,02443	1,4968	1,566	4,42
2	0,001	11,86	35,1837	1,4966		4,43
3	0,005	11,59	35,62568	1,4995		4,25
4	0,008	11,43	35,90011	1,5017		4,11
5	0,01	11,33	36,06263	1,5020		4,09
6	0,03	10,72	37,14382	1,5076		3,73
7	0,05	10,42	37,72471	1,5116		3,47
8	0,1	10,07	38,43514	1,5164		3,17
9	0,2	9,82	38,95799	0,0157		2,98
10	0,3	9,73	39,17102	1,5219		2,82
11	0,5	9,64	39,35934	1,5223		2,79
12	0,6	9,62	39,4092	1,5230		2,75
13	0,8	9,59	39,4732	1,5232		2,73
14	1	9,57	39,51254	1,5230		2,74

Таблица И.26 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек 6,0×6,0 м с размером в плане 18×36м, с покрытием сверху

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	12,89	32,61445	1,3977	1,566	10,75
2	0,001	12,79	32,76385	1,3996		10,63
3	0,005	12,64	33,04586	1,4071		10,15
4	0,008	12,51	33,22474	1,4077		10,11
5	0,01	12,49	33,33291	1,4146		9,67
6	0,03	12,13	34,09862	1,4377		8,19
7	0,05	11,92	34,54615	1,4501		7,40
8	0,1	11,67	35,13242	1,4683		6,24
9	0,2	11,48	35,59459	1,4827		5,32
10	0,3	11,4	35,79125	1,4886		4,94
11	0,5	11,33	35,96956	1,4943		4,58
12	0,6	11,31	36,01752	1,4956		4,49
13	0,8	11,29	36,07958	1,4981		4,33
14	1	11,27	36,118	1,4987		4,30

ПРИЛОЖЕНИЕ К

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЁСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица К.1 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1,5×1,5×1,5 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	60,11	15,9442	1,5577	1,603	2,83
2	0,001	6,24	49,4920	1,5579		2,82
3	0,005	1,45	102,6697	1,5585		2,77
4	0,008	1,00	123,5809	1,5626		2,52
5	0,01	0,85	134,0144	1,5650		2,37
6	0,03	0,46	184,0196	1,5794		1,47
7	0,05	0,38	202,9002	1,5859		1,06
8	0,1	0,32	221,6608	1,5929		0,63
9	0,2	0,29	233,2593	1,5974		0,35
10	0,3	0,28	237,5577	1,5992		0,24
11	0,5	0,27	241,1770	1,6007		0,15
12	0,6	0,27	242,1087	1,6010		0,12
13	0,8	0,27	243,2889	1,6015		0,09
14	1	0,26	244,0057	1,6018		0,07

Таблица К.2 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 2,0×2,0×2,0 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	87,30	13,1397	1,5365	1,603	4,15
2	0,001	9,04	40,84885	1,5371		4,11
3	0,005	2,08	85,22213	1,5393		3,97
4	0,008	1,43	102,926	1,5405		3,90
5	0,01	1,21	111,8319	1,5412		3,85
6	0,03	0,63	155,3792	1,5522		3,17
7	0,05	0,52	172,288	1,5613		2,60
8	0,1	0,43	189,4129	1,5712		1,98
9	0,2	0,39	200,1877	1,5778		1,57
10	0,3	0,37	204,2218	1,5803		1,42
11	0,5	0,36	207,6371	1,5825		1,28
12	0,6	0,36	208,5191	1,5830		1,25
13	0,8	0,35	209,6382	1,5837		1,20
14	1	0,35	210,3187	1,5842		1,17

Таблица К.3 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 3,0×3,0×3,0 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	206,25	8,42037	1,4907	1,603	7,01
2	0,001	21,23	26,26157	1,4922		6,91
3	0,005	4,78	55,4687	1,4982		6,54
4	0,008	3,23	67,50193	1,5019		6,31
5	0,01	2,72	73,66929	1,5040		6,18
6	0,03	1,34	105,3156	1,5179		5,31
7	0,05	1,07	118,4861	1,5252		4,85
8	0,1	0,86	132,5053	1,5339		4,31
9	0,2	0,75	141,7464	1,5452		3,61
10	0,3	0,72	145,3014	1,5512		3,23
11	0,5	0,69	148,3547	1,5564		2,91
12	0,6	0,69	149,1499	1,5577		2,82
13	0,8	0,68	150,163	1,5595		2,72
14	1	0,67	150,7813	1,5605		2,65

Таблица К.4 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 4,5×4,5×4,5 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	260,47	6,232228	1,0313	1,603	35,67
2	0,001	26,75	19,50656	1,0374		35,28
3	0,005	5,97	41,78321	1,0617		33,77
4	0,008	4,02	51,30405	1,0773		32,79
5	0,01	3,36	56,29185	1,0868		32,20
6	0,03	1,62	83,47709	1,1526		28,10
7	0,05	1,27	95,86165	1,1901		25,76
8	0,1	1,00	110,0245	1,2380		22,77
9	0,2	0,87	120,0566	1,2749		20,47
10	0,3	0,82	124,0915	1,2903		19,51
11	0,5	0,79	127,6439	1,3041		18,65
12	0,6	0,78	128,583	1,3078		18,42
13	0,8	0,76	129,788	1,3125		18,12
14	1	0,76	130,5282	1,3154		17,94

Таблица К.5 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 6,0×6,0×6,0 м

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	565,94	4,163401	1,0000	1,603	37,62
2	0,001	57,54	13,05693	1,0000		37,62
3	0,005	12,35	28,18906	1,0000		37,62
4	0,008	8,11	34,78976	1,0000		37,62
5	0,01	6,69	38,29057	1,0000		37,62
6	0,03	2,91	58,05049	1,0000		37,62
7	0,05	2,15	67,53976	1,0000		37,62
8	0,1	1,58	78,87801	1,0000		37,62
9	0,2	1,29	87,28106	1,0000		37,62
10	0,3	1,19	90,75922	1,0000		37,62
11	0,5	1,11	93,87185	1,0002		37,61
12	0,6	1,09	94,70286	1,0002		37,60
13	0,8	1,07	95,77428	1,0003		37,60
14	1	1,06	96,43538	1,0004		37,59

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Принятые в таблицах обозначения: n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов СПБ по одной стороне.

Таблица Л.1 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1,5×1,5×1,5 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	0,46	184,0196	1,5794	1,603	1,47
2	0,54	0,56	165,4617	1,5695		2,09
3	0,38	0,65	152,6021	1,5538		3,07
4	0,31	0,76	139,7574	1,5152		5,48
5	0,23	0,90	112,2214	1,1555		27,92
6	0,15	18,56	25,6443	1,2441		22,39

Таблица Л.2 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 2,0×2,0×2,0 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	0,63	155,3792	1,5522	1,603	3,17
2	0,4	0,99	122,3152	1,5029		6,24
3	0,2	23,63	22,7482	1,2467		22,23

Таблица Л.3 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 3,0×3,0×3,0 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	1,34	105,3156	1,5179	1,603	5,31
2	0,57	2,12	82,4785	1,4696		8,32
3	0,43	2,26	79,48937	1,4533		9,34
4	0,29	34,29	19,07988	1,2723		20,63

Таблица Л.4 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 4,5×4,5×4,5 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	1,62	83,47709	1,1526	1,603	28,10
2	0,6	2,37	65,4988	1,0365		35,34
3	0,4	43,22	16,71454	1,2308		23,22

Таблица Л.5 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 6,0×6,0×6,0 м, с различным количеством опор

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	2,91	58,05049	1,0000	1,603	37,62
2	0,5	49,23	14,95222	1,1219		30,02

ПРИЛОЖЕНИЕ М

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ СВЯЗЕЙ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица М.1 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1,5×1,5×1,5 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	0,47	179,6652	1,5622	1,603	2,55
2	0,001	0,44	186,38	1,5621		2,55
3	0,005	0,35	208,8991	1,5619		2,56
4	0,008	0,31	220,9481	1,5618		2,57
5	0,01	0,30	227,5041	1,5618		2,57
6	0,03	0,22	263,0259	1,5752		1,74
7	0,05	0,20	277,8913	1,5819		1,32
8	0,1	0,18	293,3066	1,5890		0,87
9	0,2	0,17	303,1285	1,5935		0,59
10	0,3	0,17	306,8218	1,5952		0,48
11	0,5	0,16	309,9535	1,5967		0,39
12	0,6	0,16	310,7628	1,5971		0,37
13	0,8	0,16	311,7899	1,5975		0,34
14	1	0,16	312,4147	1,5978		0,32

Таблица М.2 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 2,0×2,0×2,0 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	0,46	181,8052	1,5499	1,603	3,31
2	0,001	0,44	185,3275	1,5510		3,24
3	0,005	0,39	197,6479	1,5530		3,12
4	0,008	0,36	204,8132	1,5565		2,90
5	0,01	0,35	208,8877	1,5568		2,88
6	0,03	0,28	233,3113	1,5654		2,34
7	0,05	0,26	244,8447	1,5705		2,03
8	0,1	0,23	257,7536	1,5712		1,98
9	0,2	0,22	266,5386	1,5715		1,97
10	0,3	0,21	269,9646	1,5750		1,75
11	0,5	0,21	272,9247	1,5945		0,53
12	0,6	0,21	273,6981	1,5987		0,27
13	0,8	0,21	274,6848	1,5908		0,76
14	1	0,21	275,2877	1,5911		0,74

Таблица М.3 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 3,0×3,0×3,0 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	0,52	166,8654	1,4809	1,603	7,62
2	0,001	0,51	169,0832	1,4806		7,64
3	0,005	0,48	174,8206	1,4843		7,41
4	0,008	0,46	178,4291	1,4866		7,26
5	0,01	0,45	180,5916	1,4879		7,18
6	0,03	0,40	192,0645	1,5076		5,95
7	0,05	0,38	198,1244	1,5162		5,42
8	0,1	0,35	207,9732	1,5299		4,56
9	0,2	0,34	212,7919	1,5481		3,42
10	0,3	0,33	215,8535	1,5527		3,14
11	0,5	0,33	216,7014	1,5603		2,66
12	0,6	0,32	217,3821	1,5616		2,58
13	0,8	0,32	217,9649	1,5644		2,41
14	1	0,32	218,3668	1,5660		2,31

Таблица М.4 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 4,5×4,5×4,5 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	0,77	126,6609	1,2556	1,603	21,67
2	0,001	0,75	128,3511	1,2583		21,51
3	0,005	0,71	132,7436	1,2722		20,64
4	0,008	0,68	135,572	1,2813		20,07
5	0,01	0,67	137,2865	1,2870		19,72
6	0,03	0,58	149,495	1,3278		17,17
7	0,05	0,54	156,6997	1,3523		15,64
8	0,1	0,49	166,2473	1,3853		13,58
9	0,2	0,46	173,8847	1,4121		11,91
10	0,3	0,44	177,1679	1,4236		11,19
11	0,5	0,43	180,1613	1,4342		10,53
12	0,6	0,43	180,9689	1,4371		10,35
13	0,8	0,43	182,0152	1,4408		10,12
14	1	0,42	182,6636	1,4431		9,98

Таблица М.5 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 6,0×6,0×6,0 м, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,0001	1,18	96,63516	1,1194	1,603	30,17
2	0,001	1,14	98,08926	1,1206		30,09
3	0,005	1,08	101,1227	1,1228		29,96
4	0,008	1,04	103,0963	1,1242		29,87
5	0,01	1,01	104,3054	1,1250		29,82
6	0,03	0,87	113,2067	1,1312		29,43
7	0,05	0,79	118,7059	1,1349		29,20
8	0,1	0,70	126,2885	1,1396		28,91
9	0,2	0,64	132,6094	1,1433		28,68
10	0,3	0,61	135,3999	1,1448		28,58
11	0,5	0,59	137,9838	1,1461		28,50
12	0,6	0,58	138,6876	1,1465		28,48
13	0,8	0,58	139,6036	1,1469		28,45
14	1	0,57	140,1737	1,1472		28,43

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ОПИРАНИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Принятые в таблицах обозначения: n – количество опор по одной стороне конструкции; m – количество контурных узлов СПБ по одной стороне.

Таблица Н.1 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1,5×1,5×1,5 м, с различным количеством опор, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	0,22	263,0259	1,5752	1,603	1,74
2	0,54	0,28	235,8146	1,5727		1,89
3	0,38	0,32	217,7992	1,5562		2,92
4	0,31	0,37	199,1442	1,5130		5,62
5	0,23	0,44	163,7758	1,1954		25,43
6	0,15	8,55	37,37792	1,2182		24,01

Таблица Н.2 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 2,0×2,0×2,0 м, с различным количеством опор, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	0,28	233,3113	1,5654	1,603	2,34
2	0,4	0,43	184,8323	1,5106		5,76
3	0,2	9,67	35,211	1,2223		23,75

Таблица Н.3 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 3,0×3,0×3,0 м, с различным количеством опор, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	0,40	192,0645	1,5076	1,603	5,95
2	0,57	0,56	161,547	1,4785		7,77
3	0,43	0,59	140,691	1,1866		25,97
4	0,29	8,85	36,62865	1,2110		24,45

Таблица Н.4 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 4,5×4,5×4,5 м, с различным количеством опор, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	0,58	149,495	1,3278	1,603	17,17
2	0,6	0,83	117,9222	1,1821		26,26
3	0,4	13,83	29,59721	1,2347		22,98

Таблица Н.5 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 6,0×6,0×6,0 м, с различным количеством опор, с покрытием по верхнему поясу

№ п/п	n/m	Максимальный прогиб, W_o(мм)	Максимальная частота колебаний, ω(1/с)	$K=W_0\,\omega^2/$ $/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	1	0,87	113,2067	1,1312	1,603	29,43
2	0,5	15,67	27,70029	1,2260		23,52

ПРИЛОЖЕНИЕ П

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОДАТЛИВОСТИ СВЯЗЕЙ, КРЕПЯЩИХ ЭЛЕМЕНТЫ ПОКРЫТИЯ К ЭЛЕМЕНТАМ СПБ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица П.1 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1,5×1,5×1,5 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	0,22	263,0259	1,5752	1,603	1,74
2	10^{7}	0,22	262,888	1,5751		1,74
3	10^{5}	0,24	252,995	1,5711		1,99
4	10^{4}	0,30	225,5773	1,5664		2,28
5	$6\cdot10^{3}$	0,32	217,9222	1,5679		2,19
6	$3\cdot10^{3}$	0,36	208,2066	1,5710		2,00
7	10^{3}	0,40	196,7344	1,5754		1,72
8	$5\cdot10^{2}$	0,42	192,3055	1,5772		1,61
9	10^{2}	0,44	187,0583	1,5803		1,42
10	10	0,46	184,2347	1,5843		1,17
11	10^{-1}	0,46	183,635	1,5858		1,07
12	10^{-4}	0,46	183,6281	1,5859		1,07

Таблица П.2 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 2,0×2,0×2,0 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	0,28	233,3113	1,5654	1,603	2,34
2	10^{7}	0,28	233,1904	1,5653		2,35
3	10^{5}	0,30	224,727	1,5592		2,73
4	10^{4}	0,37	201,7455	1,5470		3,49
5	$6\cdot10^{3}$	0,40	194,7031	1,5465		3,53
6	$3\cdot10^{3}$	0,44	184,9102	1,5480		3,43
7	10^{3}	0,52	171,7627	1,5527		3,14
8	$5\cdot10^{2}$	0,55	166,1846	1,5552		2,98
9	10^{2}	0,60	159,5304	1,5590		2,74
10	10	0,63	155,9621	1,5636		2,46
11	10^{-1}	0,64	155,0836	1,5664		2,28
12	10^{-4}	0,64	155,073	1,5665		2,28

Таблица П.3 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 3,0×3,0×3,0 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	0,40	192,0645	1,5076	1,603	5,95
2	10^{7}	0,43	186,9555	1,5242		4,91
3	10^{5}	0,47	177,1609	1,5176		5,33
4	10^{4}	0,65	150,9857	1,5009		6,37
5	$6\cdot10^{3}$	0,72	143,414	1,5011		6,36
6	$3\cdot10^{3}$	0,83	133,2847	1,5061		6,05
7	10^{3}	1,03	120,3461	1,5187		5,26
8	$5\cdot10^{2}$	1,13	115,0752	1,5253		4,85
9	10^{2}	1,27	109,0077	1,5342		4,29
10	10	1,35	105,8948	1,5439		3,69
11	10^{-1}	1,38	105,1154	1,5521		3,18
12	10^{-4}	1,38	105,1037	1,5523		3,17

Таблица П.4 – Результаты численных исследований СПБ с размером ячеек на треугольном плане 4,5×4,5×4,5 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	0,58	149,495	1,3278	1,603	17,17
2	10^{7}	0,58	149,3796	1,3274		17,19
3	10^{5}	0,64	140,8597	1,3043		18,63
4	10^{4}	0,91	115,9839	1,2465		22,24
5	$6\cdot10^{3}$	1,02	109,1913	1,2385		22,74
6	$3\cdot10^{3}$	1,19	100,9164	1,2338		23,03
7	10^{3}	1,44	91,80449	1,2341		23,02
8	$5\cdot10^{2}$	1,55	88,55715	1,2353		22,94
9	10^{2}	1,67	85,17294	1,2385		22,74
10	10	1,75	83,60207	1,2489		22,09
11	10^{-1}	1,79	83,21574	1,2620		21,27
12	10^{-4}	1,79	83,21087	1,2623		21,25

Таблица П.5 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 6,0×6,0×6,0 м, при изменении податливости крепления покрытия к системе

№ п/п	EI_x;EI_y; $GI_{кр}$ вертикальных элементов	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	10^{10}	0,87	113,2067	1,1312	1,603	29,43
2	10^{7}	0,87	113,1138	1,1312		29,44
3	10^{5}	0,98	105,9617	1,1236		29,90
4	10^{4}	1,52	83,68789	1,0862		32,24
5	$6\cdot10^{3}$	1,75	77,79781	1,0794		32,67
6	$3\cdot10^{3}$	2,09	70,95944	1,0746		32,97
7	10^{3}	2,58	63,93293	1,0735		33,03
8	$5\cdot10^{2}$	2,78	61,56637	1,0742		32,99
9	10^{2}	3,01	59,1965	1,0765		32,84
10	10	3,15	58,15092	1,0875		32,16
11	10^{-1}	3,23	57,89245	1,1038		31,14
12	10^{-4}	3,23	57,88906	1,1042		31,12

ПРИЛОЖЕНИЕ Р

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СПБ НА ТРЕУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ С ПОКРЫТИЕМ ПО ВЕРХНЕМУ ПОЯСУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЖЁСТКОСТИ ПОКРЫТИЯ И РАЗМЕРА ЯЧЕЕК

Таблица Р.1 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 1,5×1,5×1,5 м, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	0,35	211,7162	1,5820	1,603	1,31
2	2,5000	0,29	232,744	1,5793		1,48
3	8,4375	0,25	249,3877	1,5770		1,62
4	20,0000	0,22	263,0259	1,5752		1,74
5	39,0625	0,20	274,4758	1,5736		1,83
6	67,5000	0,19	284,267	1,5723		1,92
7	107,1875	0,18	292,7637	1,5712		1,98
8	160,0000	0,17	300,2277	1,5703		2,04
9	227,8125	0,16	306,8535	1,5696		2,09
10	312,5000	0,16	312,7894	1,5690		2,12
11	415,9375	0,15	318,1508	1,5686		2,15
12	540,0000	0,15	323,029	1,5683		2,16

Таблица Р.2 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 2,0×2,0×2,0 м, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	0,45	184,1209	1,5673	1,603	2,22
2	2,5000	0,37	204,6913	1,5668		2,26
3	8,4375	0,32	220,5332	1,5661		2,30
4	20,0000	0,28	233,3113	1,5654		2,34
5	39,0625	0,26	243,9355	1,5648		2,38
6	67,5000	0,24	252,9653	1,5643		2,41
7	107,1875	0,23	260,7713	1,5639		2,44
8	160,0000	0,21	267,6128	1,5635		2,46
9	227,8125	0,20	273,6783	1,5634		2,47
10	312,5000	0,20	279,109	1,5632		2,48
11	415,9375	0,19	284,0134	1,5632		2,48
12	540,0000	0,18	288,4767	1,5633		2,47

Таблица Р.3 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 3,0×3,0×3,0 м, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор.}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	0,63	153,3343	1,5087	1,603	5,89
2	2,5000	0,52	168,8407	1,4994		6,46
3	8,4375	0,45	180,8512	1,5048		6,12
4	20,0000	0,40	192,0645	1,5076		5,95
5	39,0625	0,36	201,8406	1,5057		6,07
6	67,5000	0,33	209,9411	1,5041		6,17
7	107,1875	0,31	216,9355	1,5026		6,26
8	160,0000	0,30	221,1908	1,5047		6,13
9	227,8125	0,29	226,5014	1,5041		6,17
10	312,5000	0,28	231,2837	1,5038		6,19
11	415,9375	0,27	235,6543	1,5037		6,19
12	540,0000	0,26	239,5467	1,5048		6,12

Таблица Р.4 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 4,5×4,5×4,5 м, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	1,01	112,251	1,2958	1,603	19,16
2	2,5000	0,77	129,1858	1,3127		18,11
3	8,4375	0,65	140,8258	1,3220		17,53
4	20,0000	0,58	149,495	1,3278		17,17
5	39,0625	0,53	156,2808	1,3316		16,93
6	67,5000	0,50	161,7803	1,3343		16,76
7	107,1875	0,47	166,3561	1,3365		16,63
8	160,0000	0,45	170,2441	1,3382		16,52
9	227,8125	0,44	173,606	1,3398		16,42
10	312,5000	0,42	176,5573	1,3411		16,34
11	415,9375	0,41	179,1831	1,3424		16,26
12	540,0000	0,40	181,5477	1,3436		16,18

Таблица Р.5 – Результаты численных исследований СПБ на треугольном плане с размером ячеек 6,0×6,0×6,0 м, при изменении цилиндрической жёсткости покрытия

№ п/п	Цилиндрическая жёсткость, D (Кн·м)	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	Максимальная частота колебаний, ω (1/с)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{теор}$	Отклонение К от $K_{теор}$ Δ (%)
1	0,3125	1,55	84,28697	1,1225	1,603	29,98
2	2,5000	1,15	98,01372	1,1302		29,49
3	8,4375	0,97	106,8817	1,1314		29,42
4	20,0000	0,87	113,0267	1,1276		29,66
5	39,0625	0,80	117,9974	1,1307		29,46
6	67,5000	0,75	121,7809	1,1302		29,50
7	107,1875	0,71	124,8649	1,1295		29,54
8	160,0000	0,68	127,4435	1,1287		29,59
9	227,8125	0,66	129,6464	1,1280		29,63
10	312,5000	0,64	131,5644	1,1273		29,67
11	415,9375	0,62	133,263	1,1268		29,71
12	540,0000	0,61	134,7909	1,1265		29,73

ПРИЛОЖЕНИЕ С

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Цитадель»

_____Д.В. Кузнецов

24 мая 2017 г.

АКТ

О внедрении в проектную практику результатов диссертационной работы соискателя степени кандидата технических наук А.А. Макарова на тему: «Деформативность систем перекрёстных балок из клееной древесины при статическом и динамическом нагружении»

Основные положения диссертационной работы А.А. Макарова на тему: «Деформативность систем перекрёстных балок из клееной древесины при статическом и динамическом нагружении» использовались для оценки жёсткости системы перекрёстных балок при вариантном проектировании покрытия конференц-зала здания Мониторингового центра, г. Астрахань, ул. Медиков, д.6, лит. Д (проект реуонструкции № ЦТД.035.00.17).

Главный конструктор
ООО «Цитадель»

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. проректора по учебной работе
ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева»
к. ф.-м. н, доцент

_____ Е.Н. Алексеева

15 июня 2017 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы соискателя степени кандидата технических наук А.А. Макарова на тему: «Деформативность систем перекрёстных балок из клееной древесины при статическом и динамическом нагружении»

В учебном плане и рабочих программах ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» для студентов специальностей «Промышленное и гражданское строительство», «Городское строительство и хозяйство» включен материал по определению динамических и статических характеристик систем перекрёстных балок в рамках изучения дисциплин «Строительная механика», «Конструкции из дерева и пластмасс», «Обследование и испытания зданий и сооружений». Также материалы диссертационного исследования А.А. Макарова использованы при составлении рабочей программы «Спецкурс по расчёту составных стержневых, плоских и пространственных конструкций», предназначенной для аспирантов, обучающихся по специальностям 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения и по специальности 05.23.17 – Строительная механика.

Зав. кафедрой «Строительные
конструкции и материалы»
к.т.н., доцент О.А. Ветрова

15.06.2017 г.