

На правах рукописи



ШИРОКОВ ВЯЧЕСЛАВ СЕРГЕЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ВНУТРИМОДУЛЬНЫХ УЗЛОВ НА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬ-
НЫХ МОДУЛЬНЫХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ СИ-
ЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность: 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство» на кафедре «Строительные сооружения, конструкции и материалы».

Научные руководители:

Доктор технических наук, профессор

Холопов Игорь Серафимович

доктор технических наук, профессор

Белаш Татьяна Александровна

Официальные оппоненты:

Туснин Александр Романович

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» («ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»), заведующий кафедрой «Металлических и деревянных конструкций»

Бузало Нина Александровна

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» («ФГБОУ ВО «ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова»), профессор кафедры «Градостроительство, проектирование зданий и сооружений»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» (ПГУАС)

Защита состоится «10» октября 2024 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г.Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шулятьев Станислав Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Стальные модульные здания являются результатом прямого эволюционного развития строительства, направленного на повышение индустриализации строительных конструкций. Объемно-модульные здания в современном понимании представляют собой сооружение, собираемое из однотипных блок-модулей максимальной заводской готовности (до 95%).

Наиболее активное развитие модульные здания получили в XXI веке как за рубежом, так и в России. При этом из года в год объемы модульного строительства увеличиваются. Согласно экспертным отчетам, в 2022 году объем мирового рынка модульного строительства составлял около \$91 млрд. Ожидается, что к 2027 году он вырастет до \$120,4 млрд.

Несмотря на постоянно растущее число исследований в последнее время, до сих пор существует потребность в развитии подходов к расчету и оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) модульных зданий для развития нормативно-технической базы. При этом важным вопросом является определение их динамических характеристик при воздействиях сейсмике и пульсации ветра. Поэтому возникает необходимость в выполнении расчетно-теоретических исследований, устанавливающих прямую связь между геометрией модульного здания, жесткими характеристиками элементов и усилиями в конструкциях.

На НДС модульных зданий значительное влияние оказывает жесткость внутримодульных узлов. При этом для учета данного фактора в зарубежных нормах Eurocode 3 и в «Техническом кодексе ТКП EN 1993-1-8-2009 (02250)» вводится понятие вращательной жесткости (rotational stiffness), которая представляет собой момент, вызывающий единичный угол поворота узла.

В связи с этим исследование влияния жесткости внутримодульных узлов на напряженно-деформированное состояние стальных модульных зданий в условиях различных силовых воздействий является актуальной задачей, решение которой позволит ускорить развитие модульного строительства и нормативно-технической базы.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в изучение и развитие модульных зданий внесли Асаул А.Н., Казаков Ю.Н., Адам Ф.-М., Зуева А.Н., Исходжанова Г.Р., Клевцова К.С., Петров В.Э., Радыгина А.Е., Расулова В.Р., Семикин П.П., Чибирикова Д.А., Яшков М.В., Муксинов Р.М., Семенов В.С., Акбаралиев Р.Ш., Абрамян С.Г., Захарова М.В., Лукьяненко Л.А., Мушинский А.Н., Чуркин, И.О., Ryan E. Smith, Staib G., Murray-Parkes J., Teribele A., Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K., Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H., Lawson R.M., Alembagheri M., Delfani M., Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S., Lee S.-S., Thai H.-T., Chen Z., Khan K., Khan A., Ferdous W., Corfar D.-A., Tsavdaridis K.D., Ramaji I.J., Memari A.M., Lim Y.-W.

Вопросами технологической и экономической эффективности модульных зданий занимались Андриенко В.Г., Асаул А.Н., Казаков Ю.Н., Бадьин Г.М., Сычев С.А., Завражнов С.И., Дукунихин Н.И., Иванов А.А., Орлов К.О., Pathan W.T., Sardar R.J., Young B.E., Seidu R.D., Thayaparan M., Wang Z.-L., Shen H.-C., Zuo J.

Изучением силовой работы и напряженно-деформированного состояния модульных зданий, в том числе при динамических воздействиях, занимались Вашпанов К.С., Павлов А.Б., Айрумян Э.Л., Камынин С.В., Каменщиков Н.И., Грановский А.В., Смирнов В.А., Федоров М.В., Сазонов А.С., Елутин А.М., Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K., Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H., Deng E.-F., Zhang J.-F., Farajian M., Sharafi P., Jing J., Lawson R.M., Ogden R., Pedreschi R., Alembagheri M., Sultana P., Chen Z., Khan K., Liu J., Shi F., Landolfo R.

Исследованию напряженно-деформированного состояния и жесткости узловых соединений стальных конструкций посвящены работы Павлова А.Б., Бакшанского И. С., Надольского В.В., Рюмина В.В., Туснина А.Р., Тусниной В.М., Бароева Р.В., Мухина А.В., Ананьина М.Ю., Фомина Н.И., Багаутдинова Р.И., Тусниной О.А., Бузало Н.А., Šabatka L., Annan C.D.

Исследованиями вращательной жесткости узлов модульных зданий занимались Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K., Cho B.-H., Luo F.J., Ding C., Styles A., Bai Y., Zhang G., Doh J.H., Lian J.-Y., Deng E.-F., Khan K., Park K.-S., Choi K.-S.,

Ma R., Lee S.-S., Srisangeerthan S., Sendanayake S.V., Wang Y., Chen Z., Chen C., Ding Y., Dai X.-M., Zhao F., Sanches R., Mercan O., Lyu Y.-F.

Имеющиеся исследования вращательной жесткости внутримодульных узлов проводились только зарубежными авторами, при этом они рассматривали конкретные конструкции узлов. При изменении параметров соединения, например сечений элементов, использовать полученные результаты не представляется возможным. Авторы не приводят конкретных рекомендаций по конструированию рамных узлов, поэтому возникает необходимость в проведении исследований вращательной жесткости применяемых типов внутримодульных узлов с разными параметрами для установления границ рамных соединений.

Значительное влияние на НДС модульных зданий оказывают поперечные нагрузки: ветровое и сейсмическое воздействия, которые являются динамическими. Решающее значение на реакцию модульных зданий имеют собственные частоты колебаний. Несмотря на важность данного вопроса, в литературе имеется недостаточно исследований.

Объект исследования – стальные модульные здания из составленных модулей с несущими угловыми колоннами.

Предмет исследования – влияние жесткости внутримодульных узлов на напряженно-деформированное состояние модульных зданий при различных силовых воздействиях.

Цель исследования – развитие подходов в расчете и оценке напряженно-деформированного состояния стальных модульных зданий с жесткими и податливыми внутримодульными соединениями при различных вариантах силового воздействия.

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

1. Выполнить анализ состояния вопроса по теории и практике современных отечественных и зарубежных исследований, посвященных модульным зданиям со стальным каркасом и их внутримодульным узлам.

2. Провести численные исследования применяемых типов внутримодульных узлов для выявления их рациональных конструктивных решений, в том числе обеспечивающих жесткое соединение.
3. Выполнить физические испытания для подтверждения результатов, полученных на стадии численных исследований.
4. Провести расчетно-теоретические исследования влияния податливости внутримодульных узлов на напряженно-деформированное состояние стальных модульных зданий при различных вариантах силового воздействия.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

– предложен подход к расчету и оценке напряженно-деформированного состояния стальных модульных зданий при различных вариантах силового воздействия, основанный на учете влияния вращательной жесткости внутримодульных узлов;

– численными исследованиями установлено и экспериментально подтверждено значительное влияние размеров ребер на вращательную жесткость внутримодульных узлов;

– получены аналитические решения для определения усилий в элементах модульных зданий и их динамических параметров с учетом фактической жесткости внутримодульных узлов;

– показано определяющее влияние податливости внутримодульных узлов на напряженно-деформированное состояние и частоты собственных колебаний модульных зданий.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

– установлено, что внутримодульные узлы без ребер жесткости в общем случае являются податливыми;

– установлено, что наибольшее влияние на вращательную жесткость оказывают вертикальные ребра, при этом толщины стенок ригелей, материалы сварки, класс стали конструкций незначительно влияют на жесткость узла.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработаны практические рекомендации в виде номограмм для конструирования рамных внутримодульных узлов;
- предложена методика экспериментального определения вращательной жесткости внутримодульных узлов;
- адаптированы существующие инженерные методики определения пульсационного и сейсмического воздействий применительно к модульным зданиям;
- разработана программа для ЭВМ по определению усилий, позволяющая выполнять исследование и качественный анализ конструктивных решений модульных зданий.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются положения строительной механики, метод численного моделирования с применением сертифицированных конечно-элементных расчетных комплексов, теория и методы экспериментальных исследований, а также труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные модульным зданиям.

Личный вклад автора:

- выполнен обзор и анализ отечественных и зарубежных исследований модульных зданий;
- проведены численные исследования вращательной жесткости внутримодульных узлов пяти типов, по результатам которых выявлены конструкции рамных соединений;
- разработана экспериментальная схема и выполнены физические испытания полноразмерных образцов узлов;
- проведены расчетно-теоретические исследования влияния податливости внутримодульных узлов на напряженно-деформированное состояние модульных зданий.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование влияния конструктивного исполнения внутримодульных узлов на их вращательную жесткость;

- рекомендации в виде номограмм для конструирования рамных внутримодульных узлов;
- методика экспериментального определения вращательной жесткости внутримодульных узлов;
- аналитические выражения определения усилий в элементах и динамических параметров модульных зданий с жесткими и податливыми внутримодульными узлами.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается использованием общепризнанных методов расчета и расчетных подходов, удовлетворительной сходимостью численных исследований и результатов физических экспериментов, в том числе:

- использованием гипотез и допущений строительной механики;
- использованием верифицированных и сертифицированных расчетных комплексов, реализующих метод конечных элементов;
- корректным планированием экспериментальных исследований с применением оттарированного оборудования и приборов, имеющих точность измерения величин на порядок выше определяемых значений;
- верификацией результатов, полученных численными исследованиями, физическими испытаниями полноразмерных образцов узлов;
- верификацией полученных аналитических выражений результатами расчета в МКЭ комплексах.

Апробация результатов исследования. Основные выводы и результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях: 72, 73, 74, 76, 77, 80-я Всероссийская научно-техническая конференция «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре», Самара, СГАСУ/СамГТУ, апрель 2015, 2016, 2017, 2019, 2020, 2023 годов; 4-ая Всероссийская конференция «Проблемы оптимального проектирования сооружений». НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск, апрель 2017; 6-я Международная научно-техническая конференция «Строительство, архитектура и техносферная безопасность», Сочи, сентябрь 2022;

Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса», Волгоград, ВолгГТУ, декабрь 2022; VIII международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», Тамбов, май 2023; LXXVII Международная научно-практическая конференция «Архитектура-Строительство-Транспорт-Экономика», Санкт-Петербург, ноябрь 2023.

Внедрение результатов работы.

Результаты исследований внедрены:

– в рабочий процесс ООО «Строй Инжиниринг» (г. Самара) при проектировании и производстве составных блок-контейнеров, предназначенных для размещения инженерного оборудования;

– в учебный процесс ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство».

Публикации. Материалы диссертационного исследования были изложены в 25 публикациях в научных журналах и сборниках материалов конференций, в том числе 9 работ в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденном ВАК РФ (7,15 печатных листа, из них 4,1 печатных листа выполнены автором) и 5 работ в изданиях, индексируемых в зарубежных базах цитирования Scopus и Web of Science (2,68 печатных листа, из них 1,05 печатных листа выполнены автором).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, двух приложений и содержит 193 страницы машинописного текста, 93 рисунка, 21 таблицу и 94 формулы. Список работы содержит 211 наименований, в том числе 94 источника на иностранном языке.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследования влияния жесткости внутримодульных узлов на напряженно-деформированное состояние стальных модульных зданий в условиях различных силовых воздействий, определена степень разработанности проблемы, поставлены цель и задачи, определены объект и предмет исследования, приведена научная новизна, сформулированы теоретическая и практическая значимости диссертационной работы.

В первой главе приведены общие положения и основные определения по модульным зданиям. Рассмотрен опыт их применения и проведена классификация конструктивных решений. В качестве объекта исследования в работе приняты стальные модульные здания из составленных модулей с несущими угловыми колоннами, как наиболее распространенные в отечественной практике строительства (рисунок 1).

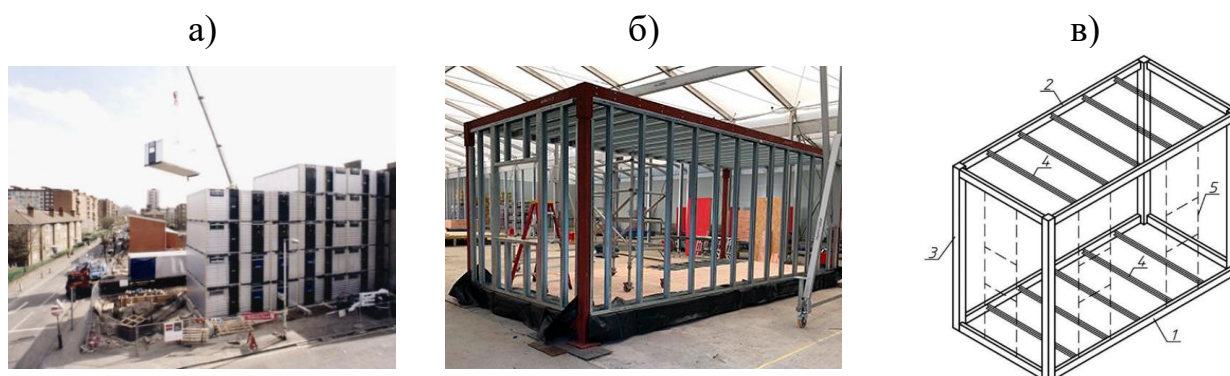


Рисунок 1 – Конструкция модульного здания: а) модульное здание; б) каркас модуля с опорными колоннами; в) схема каркаса модуля. 1 – нижняя горизонтальная рама; 2 – верхняя горизонтальная рама; 3 – колонна; 4- балки настила; 5 – стеновое ограждение (при необходимости)

На основе анализа существующих исследований жесткости внутримодульных узлов и динамических характеристик модульных зданий выявлены актуальные проблемы, требующие рассмотрения: недостаточно существующей информации по конструированию рамных узлов; отсутствие расчетно-теоретических исследований оценки НДС модульных зданий, устанавливающих прямую связь между геометрией здания, жесткостными характеристиками элементов и усилиями в конструкциях. Поставлены цель и задачи настоящего диссертационного исследования.

Во второй главе приводятся результаты исследования вращательной жесткости пяти типов внутримодульных узлов методом конечных элементов.

Численные исследования вращательной жесткости проведены для следующих внутримодульных узлов: стойка из квадратной трубы, балка из квадратной трубы, без ребра жесткости (Тр-Тр); стойка из квадратной трубы, балка из швеллера, без ребра жесткости (Тр-Шв); стойка из квадратной трубы, балка из квадратной трубы, с вертикальным ребром жесткости (Тр-Тр-ВР); стойка из квадратной трубы, балка из швеллера, с вертикальным ребром жесткости (Тр-Шв-ВР); стойка из квадратной трубы, балка из швеллера, с горизонтальными ребрами жесткости (Тр-Шв-ГР). Рассмотренные узлы приведены на рисунках 2 и 3.

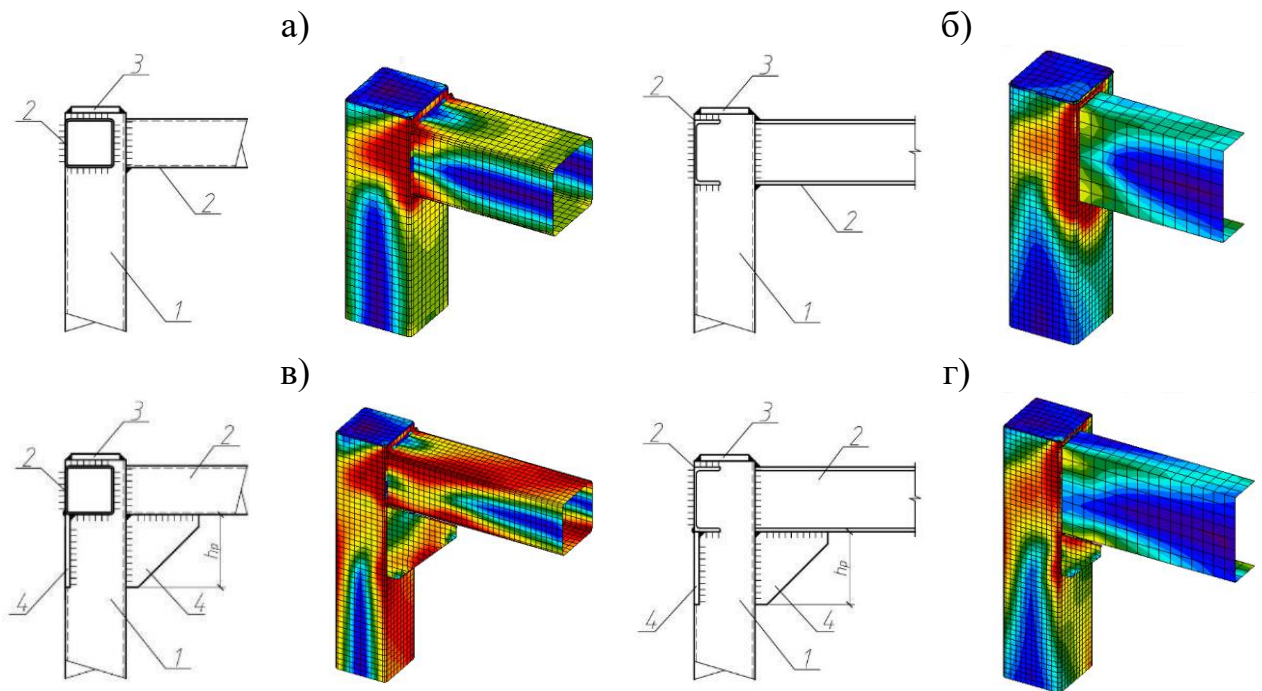


Рисунок 2 – Схемы и МКЭ модели рассмотренных узлов: а) Тр-Тр; б) Тр-Шв; в) Тр-Тр-ВР; г) Тр-Шв-ВР. 1 – стойка; 2 – балка; 3 – заглушка; 4 – ребро

Численные исследования проведены методом конечных элементов. Всего было проведено 921 численное испытание узлов (178 для Тр-Тр; 117 для Тр-Тр-ВР; 90 для Тр-Шв; 222 для Тр-Шв-ВР; 314 для Тр-Шв-ГР). По полученным результатам построены графики изменения вращательной жесткости узлов. Характерные графики приведены на рисунках 4 и 5.

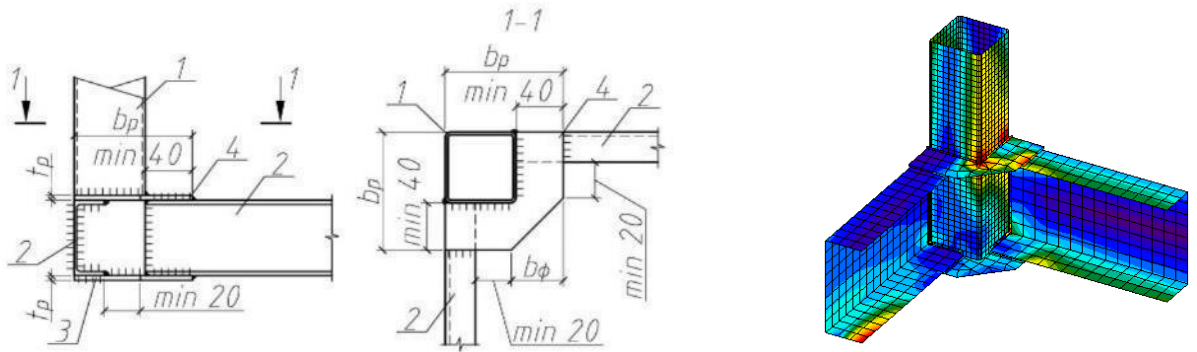


Рисунок 3 – Схема и МКЭ модель узла с горизонтальными ребрами (Тр-Шв-ГР).
1 – стойка; 2 – балка; 3 – нижнее ребро; 4 – верхнее ребро

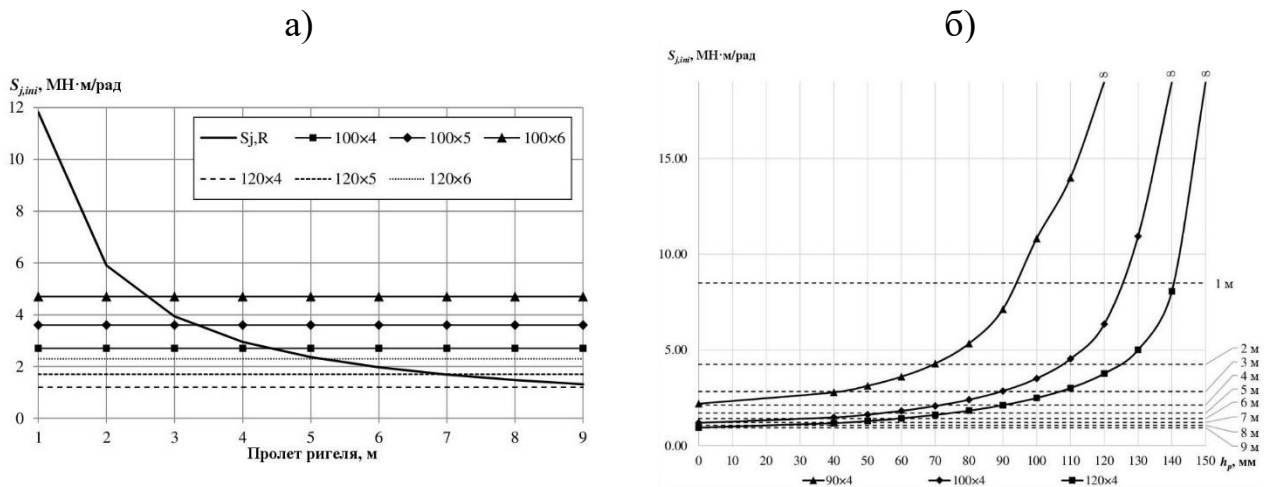


Рисунок 4 – Характерные графики изменения вращательной жесткости, соответствующей рамным соединениям ($S_{j,R}$), узлов: а) без ребра жесткости; б) с вертикальным ребром жесткости

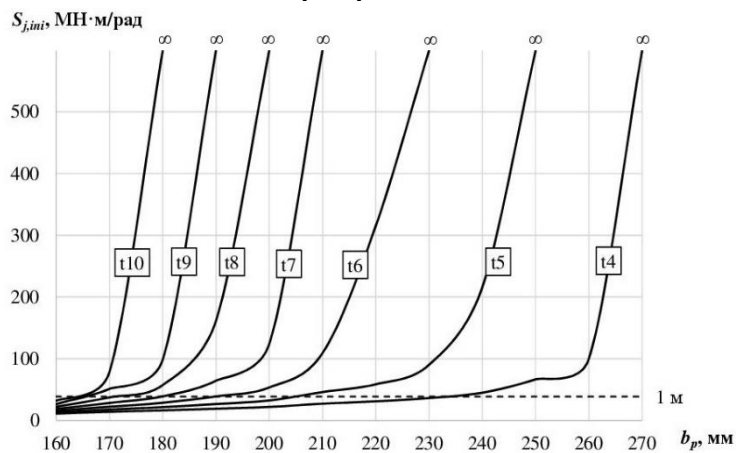


Рисунок 5 – Характерный график изменения начальной вращательной жесткости ($S_{j,ini}$) узла Тр-Шв-ГР в зависимости от ширины (b_p) и толщины (t_p) ребра
Согласно определению жестких узлов, принятому в строительной механике,

угол поворота сечения примыкающих элементов должен равняться нулю, т.е. начальная вращательная жесткость $S_{j,ini} = \infty$. Прямую зависимость вращательной жесткости от размеров ребра, ригелей и стоек установить затруднительно. Поэтому

на основе численных исследований составлены номограммы для назначения минимальных размеров ребра, обеспечивающих жесткое соединение рассмотренных типов узлов. При приведенных на рисунках 6 и 7 размерах ребра узлы обладают бесконечно большой начальной вращательной жесткостью.

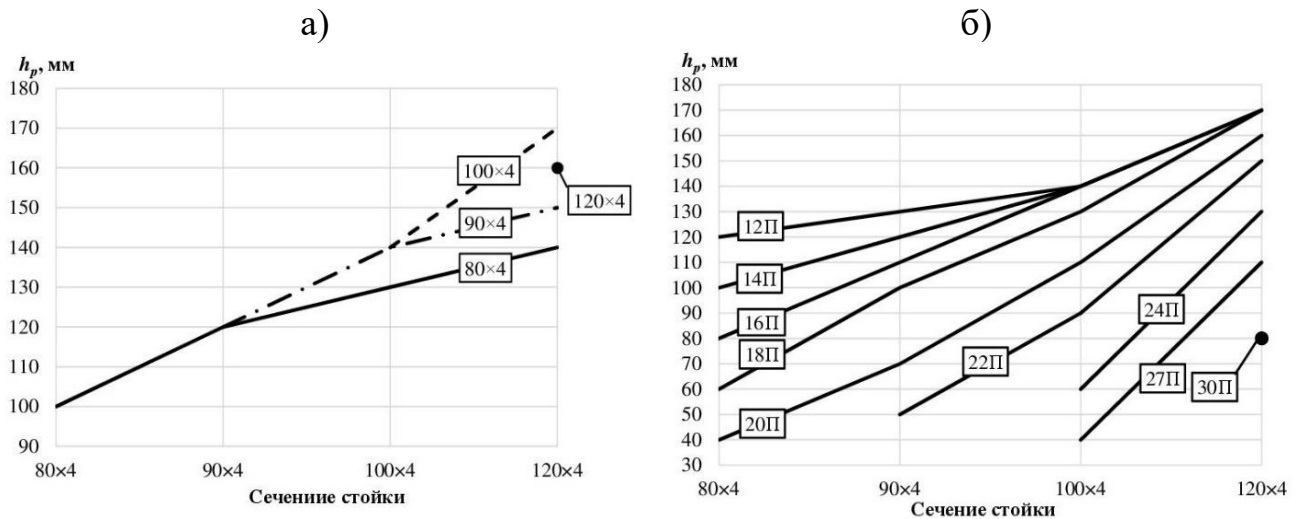


Рисунок 6 – Размеры вертикальных ребер (h_p) для жестких узлов с ригелями из:
а) квадратных труб; б) швеллеров

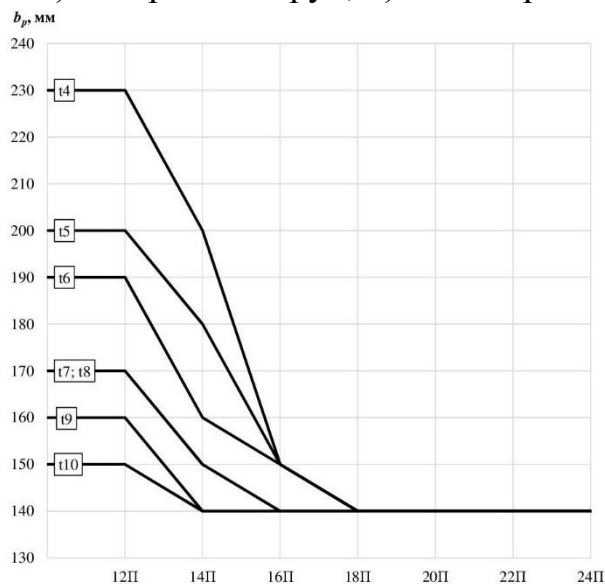


Рисунок 7 – Характерная номограмма определения размера горизонтальных ребер (b_p) для жестких узлов типа Тр-Шв-ГР

В третьей главе приводятся экспериментальные исследования двух полно-размерных образцов узлов для подтверждения результатов численных исследований вращательной жесткости.

Общий угол раствора узла определяется по правилу косинусов измерением линейной деформации между двумя точками на балке и стойке (рисунок 8, а):

$$\varphi_{\text{общ}} = \sin^{-1} \left(\frac{2 \cdot L_1 \cdot \Delta + \Delta^2}{2 \cdot a \cdot b} \right), \quad (1)$$

где L_1 – первоначальное расстояние между точками «А» и «В»;

Δ – линейное удлинение между точками «А» и «В»;

a, b – расстояния от узла до точек «А» и «В» по горизонтали и вертикали.

Для узла с вертикальным ребром при расположении точек «А» и «В» по габаритам ребра угол поворота узла равен общему углу раствора:

$$\varphi = \varphi_{\text{общ}} \quad (2)$$

Для узла без ребра жесткости на общий угол раствора влияют изгибные деформации балки и стойки, которые необходимо вычесть:

$$\varphi = \varphi_{\text{общ}} - \varphi_b - \varphi_c, \quad (3)$$

где φ_b и φ_c – углы поворота в точках «А» и «В» балки и колонны.

Углы поворота балки и стойки определялись через уравнение упругой линии. Угол поворота колонны вычислялся как угол смежности касательных в точке «В» и в точке «D», соответствующей низу балки.

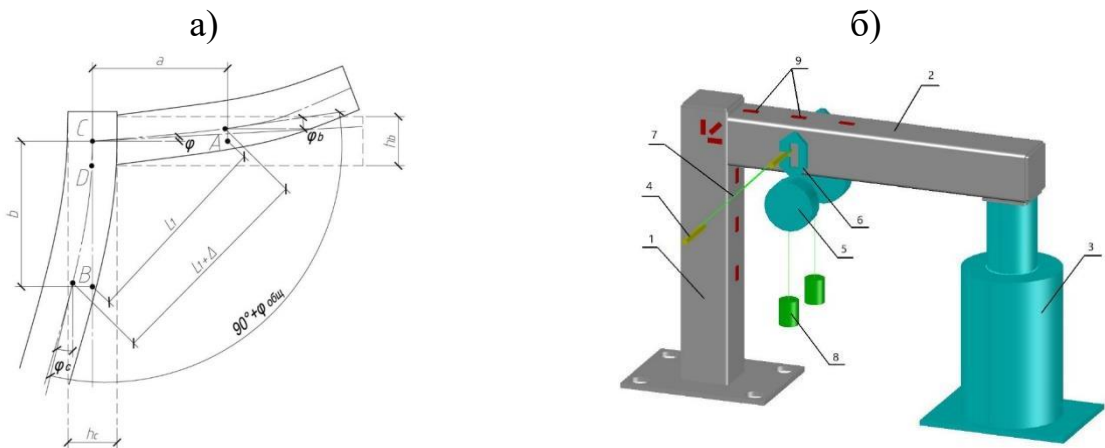


Рисунок 8 – Схема определения угла раствора (а) и схема испытательной установки (б): 1 – стойка; 2 – балка; 3 – домкрат; 4 – шпилька; 5 – прогибомер Аистова; 6 – струбцина; 7 – стальная проволока; 8 – грузик; 9 – тензодатчики

Схема испытательной установки представлена на рисунке 8, б. В точках «А» и «В» сквозь балку и стойку были пропущены шпильки, на которые закреплялись прогибомеры Аистова. Измерение напряжений в различных точках балки и стойки производилось тензорезисторами, подключенными к тензометрической станции ММТС-64.01.

Физические испытания внутримодульных узлов были проведены на двух образцах с сечениями стойки и балки из квадратной трубы 100×4 (рисунок 9). Образец О1 выполнен без ребра жесткости, образец О2 выполнен с ребром жесткости. Размер ребра выбран $h_p=130$ мм, толщина ребра $t_p=4$ мм.



Рисунок 9 – Испытанные образцы узлов: а) без ребра; б) с ребром жесткости

По результатам испытаний построены графики «Момент-угол поворота». Графики представлены на рисунке 10.

По характеру разрушения полученные результаты хорошо согласуются с зонами максимальных эквивалентных напряжений, вычисленных по МКЭ. Графики зависимости « $M-\varphi$ », полученные численно и при физических испытаниях, изменяются качественно по схожему закону. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами по МКЭ, что подтверждает достоверность численных исследований.

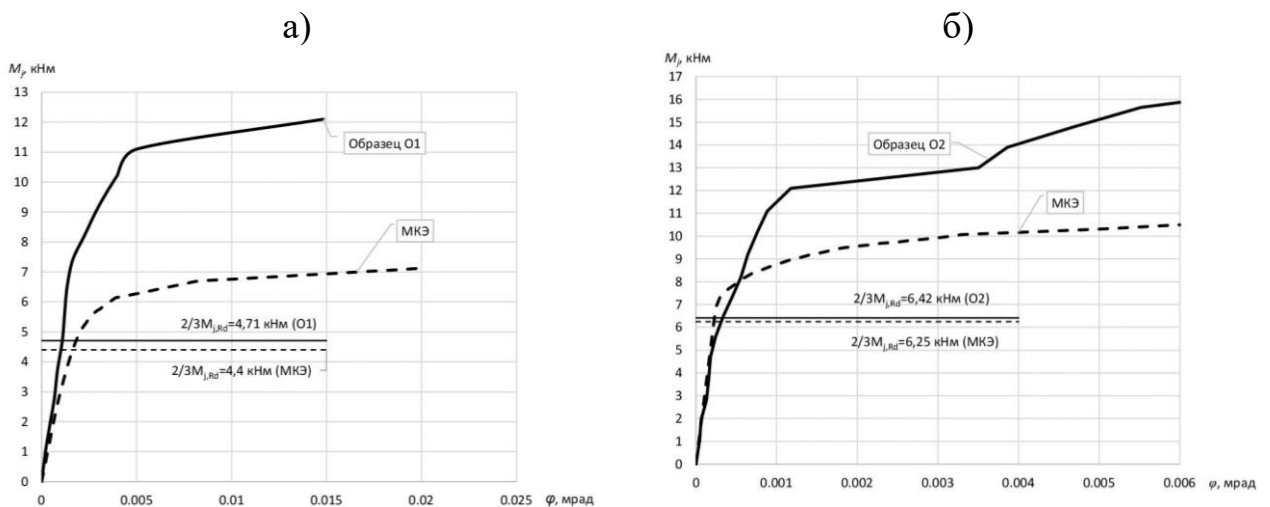


Рисунок 10 – Графики зависимости « $M-\varphi$ »: а) образец О1; б) образец О2

В четвертой главе проведены расчетно-теоретические исследования НДС стальных модульных зданий с жесткими и податливыми внутримодульными узлами при статических и динамических нагрузках. На основе анализа конструктивных решений модульных зданий, описанных в первой главе, выделены расчетные допущения для анализа напряженно-деформированного состояния прямоугольных в плане стальных модульных зданий с несущими угловыми колоннами. В конечном счете можно свести задачу оценки НДС здания к рассмотрению плоской вертикальной рамы одного модуля (рисунок 11).

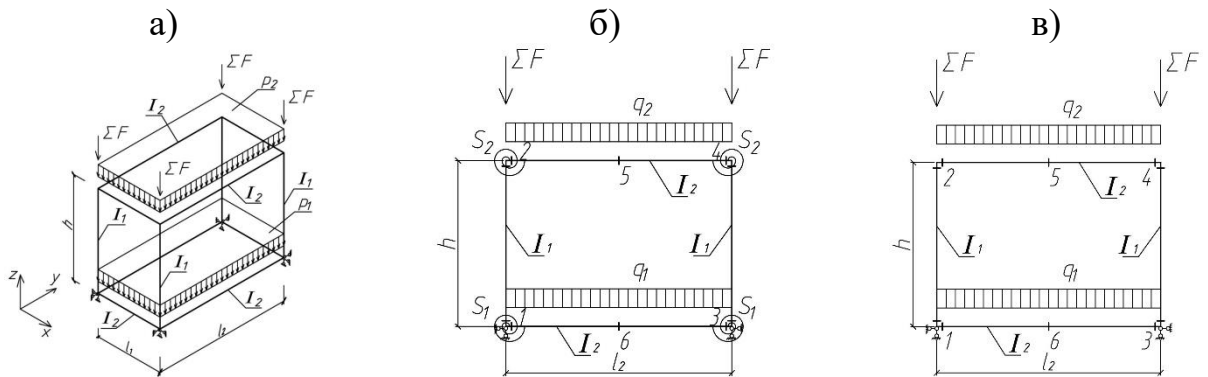


Рисунок 11 – Расчетные схемы одного модуля: а) пространственная; б) плоская с податливыми узлами; в) плоская с рамными узлами

Податливые узлы не воспринимают полный рамный момент \bar{M} . Часть M_S , которая не передается на узел, прямо пропорциональна изгибной жесткости ригеля и обратно пропорциональна вращательной жесткости узла (S_i):

$$M_S = \bar{M} \cdot \frac{E \cdot I}{l \cdot S_i}. \quad (4)$$

Изгибающий момент, передаваемый на узел равен разнице между рамным моментом \bar{M} и моментом M_S , уходящим на податливость. При разных нагрузках на ригели и разных вращательных жесткостях нижних и верхних узлов получим следующие выражения для изгибающих моментов по шести расчетным сечениям (рисунок 11, б):

$$M_2 = M_4 = \left(\bar{M}_2^B - \bar{M}_2^B \cdot \frac{E \cdot I_2}{l_2 \cdot S_2} \right) + \left(\bar{M}_2^H - \bar{M}_2^H \cdot \frac{E \cdot I_2}{l_2 \cdot S_1} - \bar{M}_2^H \cdot \frac{E \cdot I_2}{l_2 \cdot S_2} \right); \quad (5)$$

$$M_1 = M_3 = \left(\bar{M}_1^H - \bar{M}_1^H \cdot \frac{E \cdot I_2}{l_2 \cdot S_1} \right) + \left(\bar{M}_1^B - \bar{M}_1^B \cdot \frac{E \cdot I_2}{l_2 \cdot S_1} - \bar{M}_1^B \cdot \frac{E \cdot I_2}{l_2 \cdot S_2} \right); \quad (6)$$

$$M_5 = \frac{q_2 \cdot l_2^2}{8} - M_2; \quad (7)$$

$$M_6 = \frac{q_1 \cdot l_2^2}{8} - M_1. \quad (8)$$

В формулах (5)÷(8) индексы «в» и «н» означают рамные моменты в сечении при расположении нагрузки на верхнем и нижнем ригелях.

Оценить влияние податливости внутримодульных узлов на распределение усилий можно с помощью отношения, показывающего какая часть рамного момента уйдет в пролет ригеля:

$$K_M = \frac{M_s}{M}. \quad (9)$$

На рисунке 12 показано изменение K_M для конструкций внутримодульных узлов, приведенных в научной литературе (таблица 1). Предельная величина $K_M=1$ соответствует шарнирному узлу.

Таблица 1. Параметры модульных зданий для анализа влияния податливости узлов

№	Колонна	Балка	$I_1, \text{см}^4$	$I_2, \text{см}^4$	$S_{j,ini}, \text{кНм/рад}$
1	HSS 200×100×6	C 250×100×4	1703	1682	1090,3
2	Гн. уг. 150×210×30×25	–	809,5	–	6015,82
3	HSS 150×150×8	RHS 250×150×8	1411	4886	2749
4	HSS 125×125×6	C 200×75×6	643	1179	7780
5	HSS 150×150×8	HSS 150×150×8	1411	2823,6	11150
6	HSS 200×200×10	HSS 200×200×8	4251	3566	18300
7	RHS 150×100×6	C 350×100×6	834	5481	7935,57
8	SHS 100×100×9	RHS 200×100×5	408	1459,27	3727

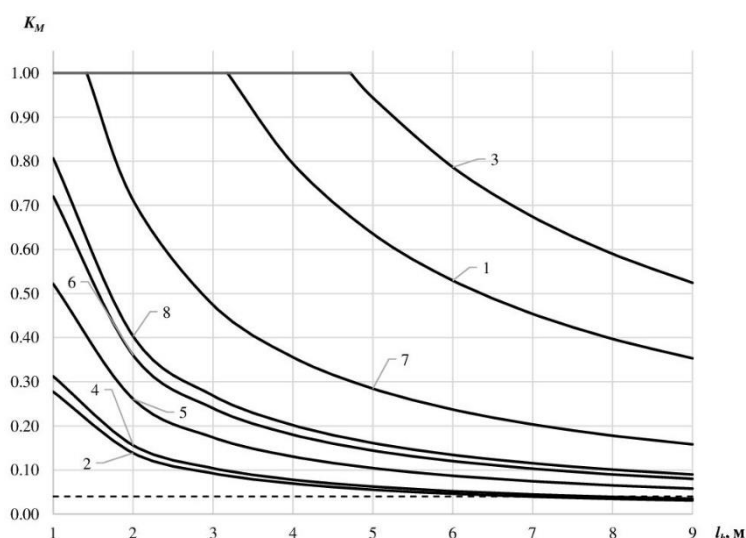


Рисунок 12 – Изменение коэффициентов K_M различных модульных зданий

При малых пролетах момент, уходящий на податливость, составляет значительную часть от рамного момента. Для некоторых решений с малой вращательной жесткостью внутримодульных узлов даже при пролетах, соответствующих длинной стороне модуля, K_M имеет высокие значения. Таким образом, неучет фактической вращательной жесткости внутримодульного узла при расчете стержневой модели модуля может привести к значительным неточностям в определении усилий.

В качестве расчетной схемы для динамических воздействий предлагается принять консольную модель с массами, сосредоточенными в уровне перекрытий. Для анализа надземных конструкций принимается гипотеза о поведении основания как единого жесткого тела. При выявленных гипотезах и допущениях динамическую расчетную схему можно свести к рассмотрению одной вертикальной рамы модуля (рисунок 13).

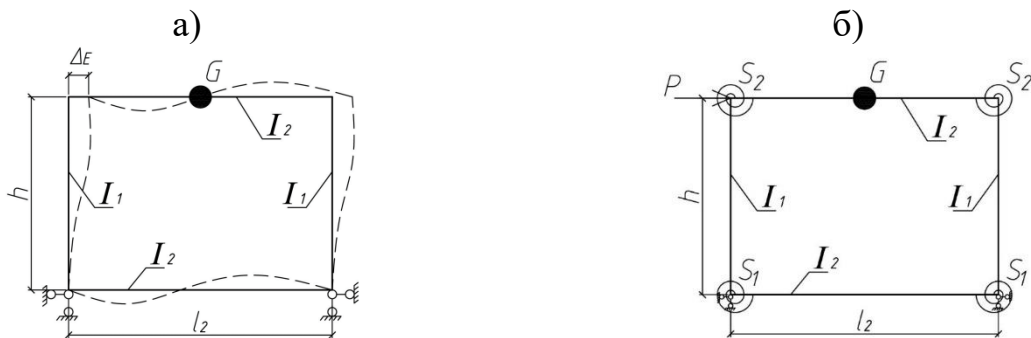


Рисунок 13 – Схемы к определению частоты колебаний модуля: а) с рамными узлами; б) с податливыми узлами

Для вывода уравнения первой частоты колебаний необходимо определить коэффициент жесткости рамы через горизонтальное смещение Δ_E . Статическое перемещение от действия силы P , расположенной в месте приложения груза:

$$\Delta_E = \frac{P \cdot h^3}{24 \cdot E \cdot I_1} \cdot \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h} \right), \quad (9)$$

где P – единичное воздействие;

E – модуль упругости стали.

Коэффициент жесткости рамы:

$$k = \frac{24 \cdot E \cdot I_1}{h^3 \cdot \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h} \right)}. \quad (10)$$

В итоге получим выражение для определения первой собственной частоты поперечных колебаний модульного здания:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot E \cdot I_1 \cdot g}{c^2 \cdot G \cdot h^3 \cdot \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h}\right)}} \quad (11)$$

где g – ускорение свободного падения;

c – количество этажей здания.

В формуле (11) член, стоящий в скобках под корнем, описывает соотношение жесткостей ригеля и стойки: чем выше данное соотношение, тем ниже будет частота. Для модульных зданий соотношение жесткостей стоек и ригелей изменяется в пределах $1 \div 4$, иногда до 7, поэтому влиянием данного члена уравнения при определении частот пренебрегать нельзя.

Суммарное горизонтальное перемещение при полужестких узлах складывается из упругой деформации, обусловленной жесткостью самой рамы и дополнительными перемещениями от податливости:

$$\Delta = \Delta_E + \Delta_{S_1} + \Delta_{S_2}, \quad (12)$$

где Δ_E – упругое перемещение, как для рамы с жесткими узлами;

Δ_{S_1} , Δ_{S_2} – дополнительные перемещения, вызванные податливостью узлов крепления нижнего и верхнего ригелей.

Так как узлы обладают конечной жесткостью, то при деформации рамы угол между ригелем и стойкой не сохраняется прямым. Изменение угла, вызванное податливостью крепления, обозначим для нижнего узла φ_1 , для верхнего – φ_2 (рисунок 14). Дополнительные перемещения от податливости узлов:

$$\Delta_{S_1} = \tan(\varphi_1) \cdot \frac{h}{2}, \quad (13)$$

$$\Delta_{S_2} = \tan(\varphi_2) \cdot \frac{h}{2}. \quad (14)$$

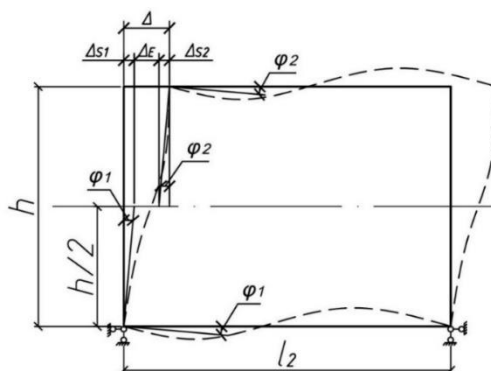


Рисунок 14 – Схема рамы с податливыми узлами к определению горизонтальных перемещений

Тогда суммарное перемещение от единичного воздействия:

$$\Delta = \frac{P \cdot h^2}{8} \cdot \left(\frac{h}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{l_2}{3 \cdot E \cdot I_2} + \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right). \quad (15)$$

В итоге получим выражение первой собственной частоты колебаний здания с учетом податливости внутримодульных узлов:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot g}{c^2 \cdot G \cdot h^2 \cdot \left(\frac{h}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{l_2}{3 \cdot E \cdot I_2} + \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right)}}. \quad (16)$$

Изменение частот собственных колебаний модульного здания в зависимости от жесткости узлов показано на конкретном примере модульного здания, описанного в литературе (рисунок 15). Сплошными линиями на графике показано изменение частоты, вычисленной в ПК «Лира-САПР», штрихпунктирными – по формуле (16). Штриховой линией показано значение частоты колебаний здания с рамными узлами, определенное по МКЭ. Вертикальными линиями на графике обозначены величины вращательной жесткости внутримодульных узлов рассмотренного здания ($S_{j,ini}=2235$ кНм/рад) и вращательной жесткости, при которой узлы можно классифицировать как рамные согласно Eurocode 3 ($S_{j,ini}=24293$ кН/рад).

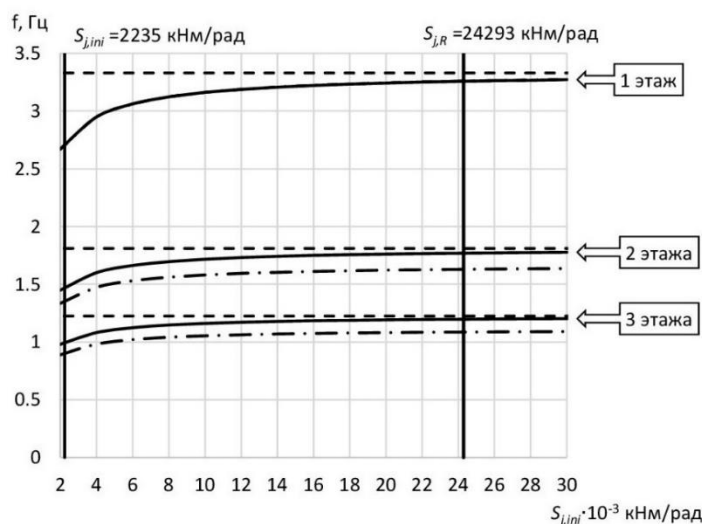


Рисунок 15 – Изменение первой собственной частоты модульного здания в зависимости от вращательной жесткости внутримодульных узлов

При низких значениях вращательных жесткостей наблюдается значительное расхождение частот по сравнению с рамными узлами. На примере рассмотренного здания видно, что необходимо учитывать податливость узлов для определения корректного значения частот колебаний.

Для оценки коэффициентов динамичности при сейсмическом воздействии рассмотрены конструктивные решения модульных зданий, описанные в научной литературе (таблица 2). Для модульных зданий с конструктивными решениями, которые находятся выше кривых, представленных на рисунке 16, коэффициент динамичности равен 2,5. Наиболее неудачным решением является такое, при котором отношение жесткости ригеля к жесткости стойки (r) меньше единицы. При $r < 1$ происходит резкое увеличение минимального момента инерции стойки, при котором коэффициент динамичности меньше 2,5.

Таблица 2. Параметры модульных зданий для анализа коэффициентов динамичности при сейсмическом воздействии

№	Колонна	Балка	$I_1, \text{см}^4$	$I_2, \text{см}^4$	r	$T, \text{с}$		
						1 эт.	2 эт.	3 эт.
1	HSS200×100×6	C250×100×4	1703	1682	0,99	0,167	0,333	0,500
2	HSS150×150×8	RHS250×150×8	1411	4886	3,46	0,132	0,265	0,397
3	HSS125×125×6	C200×75×6	643	1179	1,83	0,226	0,452	0,678
4	HSS150×150×8	C250×140×10	1411	5048	3,58	0,132	0,263	0,395
5	HSS150×150×8	HSS150×150×8	1411	1411	1,00	0,183	0,365	0,548
6	HSS200×200×10	HSS200×200×8	4251	3566	0,84	0,112	0,223	0,335
7	RHS150×100×6	C350×100×6	834	5481	6,57	0,157	0,313	0,470
8	Гн. уголок 160×4	Швеллер 16	453	747	1,65	0,277	0,553	0,830

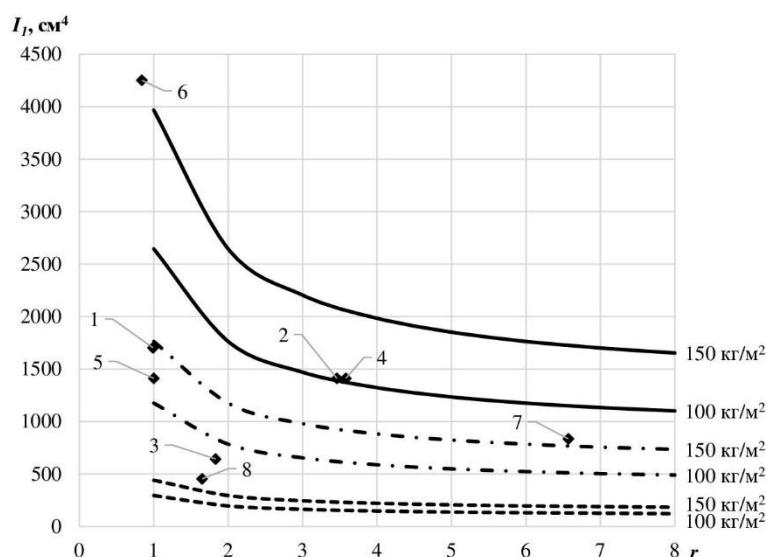


Рисунок 16 – График изменения момента инерции стойки, при котором происходит уменьшение коэффициента динамичности модульного здания для грунтов I и II категории

В рамках расчетно-теоретических исследований предложены аналитические выражения, описывающие в явном виде влияние вращательной жесткости внутримодульных узлов на распределение внутренних усилий в элементах модуля. Предложено и обосновано применение консольной расчетной схемы при определении инерционных сил от пульсации ветра и сеймики. Предложены аналитические формулы определения динамических параметров модульных зданий с жесткими и податливыми внутримодульными узлами. Предложенные формулы имеют хорошую точность определения значений первой собственной частоты и позволяют анализировать конструктивные решения модульных зданий с разными параметрами без построения расчетных схем в вычислительных комплексах. Адаптированы существующие методы определения динамических воздействий применительно к модульным зданиям. Описана зарегистрированная программа для ЭВМ «Modular», реализующая предложенные аналитические зависимости для расчета модульных зданий.

Заключение

1. Проведена классификация стальных модульных зданий и выявлены проблемные направления их исследований на основе анализа теоретических и практических работ отечественных и зарубежных авторов.
2. На основании расчетно-теоретических исследований предложен подход к оценке напряженно-деформированного состояния стальных модульных зданий, основанный на учете влияния вращательной жесткости внутримодульных узлов, при различных вариантах силового воздействия.
3. На основании численных исследований вращательной жесткости пяти типов внутримодульных узлов установлено, что внутримодульные узлы без ребер в общем случае являются полужесткими.
4. Установлено, что толщины стенок ригелей, материалы сварки, класс стали конструкций, толщины ребер незначительно влияют на жесткость узла.
5. Установлено, что с точки зрения повышения вращательной жесткости эффективнее применять узлы с вертикальными ребрами, чем с горизонтальными.
6. Разработаны номограммы по определению минимальных размеров ребер для конструирования рамных внутримодульных узлов.
7. Проведены физические испытания двух полноразмерных внутримодульных узлов для определения вращательной жесткости, подтверждающие результаты, полученные методом конечных элементов.
8. Выявлены основные допущения для составления расчетных схем стальных модульных зданий с угловыми несущими колоннами.
9. Получены выражения, описывающие в явном виде влияние вращательной жесткости внутримодульных узлов на распределение внутренних усилий в элементах модуля, при этом показано, что неучет фактической податливости узлов при расчете стержневой модели может привести к значительным неточностям в определении усилий.
10. Обосновано применение консольной расчетной схемы при определении инерционных сил динамических воздействий (пульсация ветра и сейсмика),

при этом показана возможность приведения расчетной схемы к системе с одной степенью свободы.

11. Получены аналитические выражения для определения первой собственной частоты колебаний модульных зданий с жесткими и податливыми внутримодульными узлами.

12. Показано, что соотношения жесткостей ригеля и стойки, а также вращательная жесткость внутримодульных узлов оказывают значительное влияние на частоту собственных колебаний модульного здания.

13. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Modular», реализующая предложенные аналитические выражения для расчета модульных зданий.

14. Выполненные в работе численные, экспериментальные и расчетно-теоретические исследования вносят вклад в развитие подходов к расчету и оценке напряженно-деформированного состояния стальных модульных зданий.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В работе была исследована вращательная жесткость нескольких типов внутримодульных узлов. В дальнейшем важно рассмотреть другие конструкции узлов, в том числе с большей номенклатурой профилей. Полученные результаты могут использоваться для развития аналитических методов определения податливости узлов металлических конструкций.

Аналитические решения, приведенные в диссертации, справедливы для составленных модульных зданий с несущими угловыми колоннами. Интерес представляет проведение аналогичных исследований для других конструктивных схем. На основании подобных исследований возможно формирование нормативной базы по проектированию модульных зданий.

Также полученные результаты могут служить базисом для постановки задачи исследования модульных зданий с точки зрения оптимального проектирования.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии:

1. **Широков В.С., Белаш Т.А., Гордеева Т.Е.** Аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния модульных зданий // Вестник МГСУ. 2024. Т.19, №3. С. 357-366. (К1)
2. **Широков В. С.** Влияние податливости внутримодульных узлов на частоту собственных колебаний модульного здания // Вестник МГСУ. 2023. Т.18, №.10. С. 1556-1562. (К1)
3. **Широков В.С., Белаш Т.А.** Вращательная жесткость внутримодульных узловых соединений с горизонтальными ребрами // Промышленное и гражданское строительство. 2022. №4. С. 57-63.
4. **Широков В.С.** Коэффициент динамичности модульных зданий при сейсмическом воздействии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. №4. С. 23-33.
5. **Широков В.С.** Конструктивные особенности модульных зданий // Вестник евразийской науки. 2022. Т.14, №3. С. 2.
6. **Широков В.С., Алпатов В.Ю., Гордеев Е.А.** Исследование жесткости узлов соединений ригеля и стойки модульных быстровозводимых зданий // Вестник МГСУ. 2021. Т.16, №1. С. 20-29.
7. **Широков В.С., Гордеева Т.Е.** Исследование жесткости узла соединения ригеля со стойкой модульного здания // Вестник гражданских инженеров. 2020. №6 (83). С. 90-96.
8. **Широков В.С., Соловьёв А.В.** Анализ конструктивного исполнения серийных модульных зданий // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, №1 (30). С. 24-27.
9. **Холопов И.С., Широков В.С., Соловьев А.В., Макаров Ю.Д.** Анализ напряженно-деформированного состояния быстровозводимого модульного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №6. С. 15-19.

Научные статьи, опубликованные в научных изданиях, индексируемых в зарубежных базах данных Scopus и Web of Science:

10. **Shirokov V., Belash T.** Parametric Studies of Intra-Modular Connections Stiffness // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Cham : Springer International Publishing, 2022. P. 45-57. (Scopus)
11. **Shirokov V., Veremeenko O., Alpatov V.** Investigation of the modular building metal frame nodal connection rotational stiffness // E3S Web of conferences. EDP Sciences, 2021. V. 281. P. 01045. (Scopus)
12. **Shirokov V.S., Gordeeva T.E., Bocharov A.Yu.** Analytic method of structural analysis of modular buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies, CAEST 2019. 2020. P. 012148. (Scopus)
13. **Shirokov V.S., Soloviev A.V., Gordeeva T.E.** Determining internal forces in modular building elements under action wind load // MATEC Web of Conferences. 2018. №196. P. 02010. (Scopus, WoS)
14. **Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovjev A.V.** Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building // XXV Polish–Russian–Slovak Seminar “Theoretical Foundation of Civil Engineering”. Сер. "Procedia Engineering". 2016. V. 153. P. 655-661. (Scopus, WoS)

Публикации в других изданиях:

15. **Широков В.С., Белаш Т.А., Гордеева Т.Е.** Аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния модульных зданий В книге: Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений. Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума. Тамбов, 2023. С. 187-189
16. **Широков В.С.** Планирование экспериментального исследования вращательной жесткости узла // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре.

Строительство и строительные технологии. Сборник статей 80-ой Юбилейной все-российской научно-технической конференции. Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. Самара, 2023. С. 21-29

17. **Широков В.С.** Влияние параметров внутримодульного соединения на его жесткость // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Волгоград, 2022. С. 79-86

18. **Широков В.С.** Программа «Modular» для расчета модульных зданий // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Сборник статей 77-ой все-российской научно-технической конференции. Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, В.Ю. Алпатова. Самара, 2020. С. 75-79

19. **Широков В.С.** Определение усилий в элементах модульных зданий при сейсмическом воздействии // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. сборник статей. Самарский государственный технический университет. Самара, 2019. С. 23-28

20. **Широков В.С.** Определение напряженно-деформированного состояния модульных зданий при действии динамических нагрузок // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Сборник статей. Самарский государственный технический университет. Самара, 2017. С. 23-27

21. **Широков В.С.** Определение собственных частот поперечных колебаний многоэтажного модульного здания // Проблемы оптимального проектирования сооружений. Доклады 4-ой Всероссийской конференции. Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Сибирское отделение Российской академии архитектуры и строительных наук. Новосибирск, 2017. С. 327-335

22. **Широков В.С., Соловьёв А.В., Холопов И.С.** Учет пульсационной ветровой нагрузки при расчете производственного модульного здания // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Самара, 2016. С. 18-21

23. **Широков В.С., Холопов И.С., Соловьев А.В.** Расчет модульного здания, собираемого из блок-боксов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Сборник статей. под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, В.П. Попова; Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Самара, 2015. С. 84-89

24. **Холопов И.С., Широков В.С., Соловьев А.В.** Усиление несущих конструкций и узловых соединений быстровозводимого модульного здания с целью обеспечения его безопасной эксплуатации // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2015. №4 (26). С. 56-62.

Объект интеллектуальной собственности:

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666107 Российская Федерация. Modular : № 2019664955 : заявл. 20.11.2019 : опубл. 04.12.2019 / **В. С. Широков.**

