

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ВЫСШАЯ ШКОЛА ПРОМЫШЛЕННО-ГРАЖДАНСКОГО И ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

На правах рукописи

Багаутдинов Руслан Ильдарович

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РАМ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ
ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЖЕСТКОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ**

**научный доклад об основных результатах подготовленной научно-
квалификационной работы (диссертации)**

Направление подготовки 08.06.01 «Техника и технологии строительства»

Научная специальность «Строительная механика»

Научный руководитель:

Лалин Владимир Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Директор ВШПГиДС:

Лазарев Юрий Георгиевич,
доктор технических наук, профессор

Директор ИСИ:

Козинец Галина Леонидовна,
доктор технических наук, профессор

Санкт-Петербург

2020 г.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные подходы к анализу и оптимизации рам каркасных зданий позволяют учесть все ограничения, установленные строительными нормами, требованиями заказчика или другими факторами, а также позволяет выбрать наилучший вариант при проектировании, что приводит к значительному снижению денежных затрат на всех этапах жизненного цикла каркасных зданий: при проектировании конструкции, ее изготовлении, монтаже, на стадии эксплуатации, ремонта, усиления и демонтажа конструкции [1-3].

Учет конечной жесткости узлов и элементов каркасных зданий и подбор оптимальных значений позволяет значительно снизить затраты и обеспечить высокую надежность и долговечность каркасных зданий. Перераспределение усилий воспринимаемых колоннами и балками зависит от конечной жесткости узлов. По мере ее увеличения балки больше вовлекаются в восприятие горизонтальной нагрузки, а на колонны передаются большие сосредоточенные моменты, при этом меняются динамические характеристики, коэффициенты расчетных длин элементов при расчете устойчивости, надежность конструкции и т.д.

Основы анализа каркасов стальных конструкций были заложены Д. Незеркотом и Л. Гарднером в начале XIX века [4-6]. Тем не менее, данной теме посвящено множество международных конференций и исследований в настоящее время. В действующих европейских и американских строительных нормах описаны методы анализа рам каркасных зданий с учетом конечной жесткости узлов и элементов каркасных зданий. Актуален вопрос разработки отечественных норм и внедрения в практику проектирования методов поиска оптимальных жесткостных характеристик.

В настоящее время оптимизации строительных конструкций уделяется особенное внимание, но не достаточно проработан вопрос комплексного анализа и оптимального проектирования рам каркасных зданий, достаточно

простой для успешной интеграции в процесс проектирования с учетом всех особенностей современных подходов и норм.

Степень разработанности темы исследования. Основы анализа каркасов стальных конструкций были заложены Д. Незеркотом и Л. Гарднером в начале XIX века и активно развиваются по настоящее время [4-6]. В еврокоде предложена методика учета конечной жесткости узлов в проектировании, разработанная в результате множества исследований М. Фрая, Г. Морриса, Р. Ричарда, Н. Киши, В. Чена [7-9]. В работах М. Хейнисуо [10] рассмотрена возможность применения линейной модели конечной жесткости узла и определения оптимальной характеристики зависимости момента от угла поворота при проектировании примыкания балки к колонне. Я. Хаапио [11] в своей докторской диссертации рассмотрел возможность автоматизированного анализа стоимости и экологического влияния конструкции на основе использования технологии Информационного Моделирования Зданий (BIM). На основе разработанной методики и исследования Я. Лихтарникова [12] предложен подход, позволяющий учесть комплекс факторов [13].

В Великобритании еще в 1930 году были представлены результаты расчетов, по результатам которых учет изгибной жесткости узлов сокращает материалоемкость каркасов до 20%. Вопросам поучения функции жесткости узлов и распределение усилий в каркасах при учете конечной жесткости узлов посвящены работы большого числа ученых, в том числе отечественных, таких как Е. И. Беленя, В. М. Горпинчегасо, И. Д. Грудева, В. В. Каленова, А. Б. Павлова, Т. Н. Морачевского, Я. И. Олькова, А. В. Ренского, П. Н. Троицкого, В. М. Тусниной, Б. С. Цетлина и других авторов [14-16].

Позже Клюев С. и Клюев А. исследовали различные методики поиска оптимальных параметров рамных каркасов зданий [1-3].

Учет конечной жесткости необходим в железобетонных каркасах, где вместо узловой изгибной жесткости необходимо учитывать редуцированную жесткость элементов при трещинообразовании с учетом армирования.

Городецкий А. С. и Барабаш М. С. в [17, 18] представили инструмент «Инженерная нелинейность», реализованный в ПК ЛИРА САПР. Он представляет собой процедуру определения жесткостных характеристик во всех конечных элементах железобетонных конструкций. Данный способ схож с традиционными способами расчета, но включает также итерационный подход учета жесткости, что позволяет уточнить результаты расчета и получить меньшую материалоемкость. Это было показано на примере анализа рамы каркасного здания. Результаты расчета с помощью данного метода показывают, что усилия в элементе напряженно-деформированное состояние значительно меняется.

Цель и задачи исследования.

Цели:

- комплексный анализ рам каркасных зданий при варьировании распределения конечных жесткостей их элементов и узлов;
- получение оптимальной конечной жесткости и исследование влияния факторов статического распределения усилий в раме, устойчивости ее элементов и влияния на динамические характеристики.

Задачи исследования:

- анализ особенностей проектирования конструкций рам каркасных зданий и обоснование критериев оптимальности при учете влияния конечных жесткостей элементов и узлов;
- описание предлагаемого алгоритма комплексного анализа рамных каркасов;
- определение оптимальной жесткости для многоэтажной стальной рамы и апробация результатов;
- описание особенностей внедрения в практику проектирования и путей дальнейшего развития предложенного метода комплексного анализа рам каркасных зданий;

Объектом исследования является рама каркасных зданий.

Предметом исследования является конечная жесткость элементов и узлов каркасных зданий.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Представлена оптимальная жесткость узлов по распределению усилий в каркасе многоэтажного здания;
2. Проверено соответствие полученной конечной жесткости критериям оптимальности посредством учета факторов устойчивости и динамики;
3. Предложен алгоритм комплексного анализа рамных каркасов на упрощенных моделях каркаса здания;

Теоретическая и практическая значимость. По предложенному в данной работе алгоритму возможен подбор оптимальных жесткостных характеристик узлов и элементов по распределению усилий при учете факторов устойчивости и динамики. Оптимальным можно считать такое распределение жесткостей в раме, при котором общие затраты на материал каркаса, монтаж и т.п. будет минимизировано. Одновременно соблюдаются требования прочности, устойчивости и жесткости конструкции, а также можно варьировать динамические характеристики конструкции, тем самым увеличивая надежность каркаса.

Данный комплексный подход может быть успешно внедрен в процесс проектирования ввиду простоты понимания и использования проектировщиком, а также позволит более детально контролировать реальное распределение внутренних усилий, деформаций и другие характеристики устойчивости и динамики всего каркаса и его элементов .

Методология и методы исследования. Каркас здания был сведен к упрощенным моделям, которые позволили проанализировать работу каркаса при варьировании конечной жесткости узлов. Результаты расчета H-образной рамы были проанализированы, в результате чего была выведена оптимальная жесткость узла соединения балок и колонн каркасного здания, при которой изгибающий момент в середине пролета балки равен наиболее нагруженному

из ее узлов. На основе этого уравнения была получена формула оптимальной конечной жесткости для узлов каркасных зданий.

Современные задачи оптимизации решаются на основе многокритериальных инструментов оптимизации [19], где учитывается множество целевых функций. Использовать одну целевую функцию в задаче оптимизации зачастую нерационально [20]. Требования к экономической эффективности объектов строительства становятся все более жесткими в условиях роста конкуренции на рынке, поэтому необходимо развивать методы многокритериальной оптимизации и использовать инструменты комплексного анализ. Примерами могут служить: минимальная стоимость, минимальные затраты на содержание объектов строительства, за счет уменьшения потерь энергии через ограждающие конструкции, минимальное воздействие на окружающую среду. Комплекс требований должен быть преобразован в формат критериев оптимизации и ограничений.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- формула оптимальной жесткости узлов по распределению усилий в каркасе многоэтажного здания;
- алгоритм комплексного анализа рам каркасных зданий на упрощенных расчетных моделях и подход при выборе оптимальной жесткостной характеристики.

Достоверность данной работы формируется на базе применения стандартного математического аппарата и теоретических основ механики конструкций. При применении упрощенных моделей, не учитывающей неравномерное восприятие горизонтальной нагрузки вертикальными конструкциями здания, была получена формула для определения оптимальной конечной жесткости узлов соединения балок и колонн каркасных зданий по критерию наиболее равномерного распределения усилий в балке при учете факторов устойчивости и динамики. При этом была проанализирована серия рам с различным количеством пролетов и этажей и произведена оценка соответствия выбранному критерию оптимальности.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на 2 конференциях и опубликованы в 1 журнале рецензируемом ВАК:

- Публикация научной статьи «Численное моделирование конечной жесткости узлов колонны с балкой» во 2 выпуске 14 тома журнала «Вестник МГСУ» (Москва, 2019 г.);

- Доклад «Оптимизация информационной модели металлокаркаса посредством учета конечной жесткости узлов» на X научно-практической конференции с международным участием «Проблемы прочности на транспорте» и публикацией в сборнике тезисов конференции (Санкт-Петербург, 23 мая 2017 г.);

- Доклад «Моделирование и анализ работы и разрушения узлов металлоконструкции» на X научно-практической конференции с международным участием «Проблемы прочности на транспорте» и публикацией в сборнике тезисов конференции (Санкт-Петербург, 23 мая 2017 г.);

- Доклад «Feasibility study tool for semi-rigid joints design of high-rise buildings steel structures» на международной научной конференции «High-Rise Construction-2017» (HRC 2017) с публикацией в сборнике (Санкт-Петербург, 8 сентября 2017 г.).

- Доклад «Оптимальная жесткостная характеристика узла соединения балок и колонн каркасных зданий» на научно конференции Неделя науки СПбПУ и публикация в сборнике материалов научной конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 2019 г.);

- Доклад «Minimum bending moment distribution in skeletal structures» на международной научной конференции «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (MPCPE 2020) с публикацией в сборнике (Санкт-Петербург, 27-28 апреля 2020 г.).

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и определяются задачи исследования, приводятся основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

Глава 1. Критерии оптимальности и задача многокритериальной оптимизации

При проектировании каркасных зданий необходимо учитывать особенность работы ригелей при восприятии горизонтальных нагрузок. Особенно важно правильно учесть реальную схему деформирования рамных каркасов в высотном строительстве. Возможность варьировать жесткость узлов соединения балок и колонн позволяет проектировщику учесть распределение энергии деформации между элементами каркаса, что позволит оптимизировать работу всего каркаса в целом при восприятии внешних нагрузок.

Основной задачей при проектировании каркаса является обеспечение всех требований по прочности, жесткости, динамике при минимальных затратах. Использование в расчетах реальную жесткость узлов снижает затраты материала примерно на 30% по сравнению с классическим разделением узлов на жесткие и шарнирные

В данной главе рассмотрены основные целевые функции, которые могут быть оптимизированы при проектировании рам каркасных зданий. В соответствии с анализом влияния конечной жесткости узлов на различные характеристики конструкции при расчете по 1 и 2 группе предельных состояний были выделены следующие критерии оптимальности:

1. Минимальное значение максимального момента в балке первого этажа. Увеличение жесткости повышает воспринимаемый узлом момент, что

сильно повышает трудоемкость изготовления и сложность проектирования узлов. В то же время уменьшается момент воспринимаемый колоннами нижних этажей, за счет распределения нагрузки на балки и более равномерного восприятия горизонтальных нагрузок колоннами всех этажей.

2. Минимальная критическая сила при расчете колонн первого этажа на устойчивость. С ростом жесткости узлов понижается момент, воспринимаемый колоннами первого этажа, и повышается момент, воспринимаемый колоннами верхних этажей, таким образом, колонны воспринимают горизонтальную нагрузку более равномерно. Также с ростом конечной жесткости узлов понижается коэффициент расчетной длины колонн, что приводит к увеличению критической силы.

3. Минимальный коэффициент динамичности. При увеличении жесткости узлов повышаются собственные частоты колебания конструкции, что может приводить в разных случаях, как к уменьшению, так и увеличению коэффициента динамичности. Однако, понижение жесткости положительно влияет на восприятие инертно-ориентированных нагрузок, вследствие большего рассеивания энергии при уменьшении жесткости каркаса, и соответственно собственных частот.

4. Также ограничивается максимальное горизонтальное перемещение верхнего этажа. Оно должно быть минимальным для удовлетворения требований 2 группы предельных состояний.

Для подбора конечной жесткости узлов соединения балок и колонны необходимо последовательно решить соответствующий ряд задач. В данной работе выделены следующие 3 задачи:

Задача №1 заключается в расчете оптимальной жесткости узлов по распределению усилий в многоэтажном каркасном здании. Оптимальным распределение усилий в каркасе будет, когда общая металлоемкость и трудоемкость монтажа узлов будут минимальными. В то же время необходимо обеспечить выполнение условий прочности и жесткости каркаса здания, а

также проверить удовлетворяет ли деформированное состояние конструкции критериям 2 группы предельных состояний.

Задача №2 заключается в расчете рамного каркаса на устойчивость. Для этого необходимо получить критическую интенсивность полезной нагрузки при ее совместном действии с моментом передаваемым от балок на колонны. Оптимальная критическая сила приводит к минимальным затратам на колонны.

Задача №3 заключается в подборе оптимальной жесткости узлов, при которой коэффициент динамичности будет минимальным для заданных динамических воздействий и характеристик района строительства.

В результате будет получена конечная оптимальную жесткость узлов, которая обеспечит выполнение всех требований строительных норм и правил, в то же время обеспечивая минимальную материалоемкость каркаса.

Решение задач многокритериальной оптимизации усложняется из-за использования множества целевых функций и приводит к ряду проблем [21]. Во-первых, необходимо четко определить и обосновать какое решение будет являться оптимальным. Во-вторых, некоторые целевые функции могут конфликтовать друг с другом. Поэтому требуется уметь искать компромиссное решение и выделять весовые коэффициенты каждой целевой функции.

Многокритериальные задачи в отличие от обычных однокритериальных задач имеют следующие особенности:

Критерии часто конфликтуют между собой и необходимо находить компромиссное решение [22]. Таким образом, сложно найти решение, которое будет оптимально с точки зрения всех поставленных критериев оптимальности [23].

Сложно привести все требования к проекту к математическому представлению целевых функций так, чтобы они измерялись в одинаковых единицах, что часто делает сравнение некоторых критериев бессмысленным [24].

Для устранения таких особенностей обычно все исходные данные нормализуют.

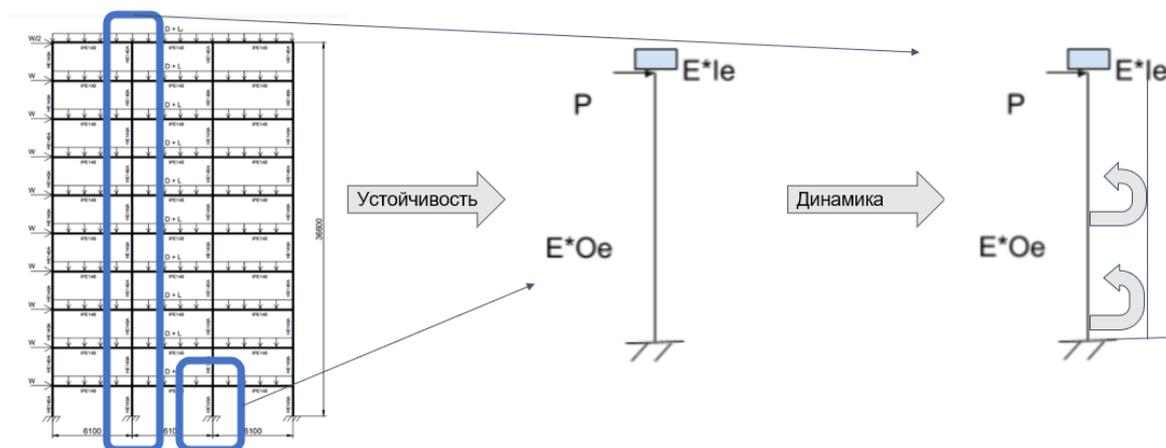


Рис. 1. Упрощенные модели каркаса для поиска оптимального решения

Для учета всех вышеизложенных факторов предлагается использовать постановку задачи многокритериальной оптимизации. Постановка задачи многокритериальной оптимизации включает следующие составляющие [41]:

$F(x) = f_1(x) \dots f_n(x) \rightarrow \min (\max)$ - набор функций оптимизации

Где $x \in (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ - набор из n проектных переменных

Ограничения проекта:

$g_i(x) \leq 0, i \in 1 \dots t$ - заданных в виде неравенств

$h_j(x) \leq 0, j \in 1 \dots k$ - заданных в виде равенств

Глава 2. Определение оптимальной жесткости для узлов рамы каркасного здания

2.1 Описание предпосылок и особенностей применения комплексного анализа при проектировании каркасных зданий

Для того, чтобы произвести комплексный анализ рамы каркасного здания необходимо определить по какому из параметров будет производиться оценка варианта проектирования. В данной работе рассмотрена возможность анализа стоимости каркаса, как характеристика, наиболее полно отражающая совместное влияния комплекса факторов, таких как распределение внутренних усилий и деформации в схеме, устойчивость и динамические

характеристики модели и ее элементов. Для того чтобы наиболее удобным образом для проектировщика производить оценку вариантов проектирования и выбирать оптимальное распределение конечных жесткостей элементов и узлов рам каркасных зданий требуется обеспечить двустороннюю связь между моделями информационного моделирования и программами расчета модели здания. Оценка всех издержек возможно произвести в программах для анализа информационной модели здания, таких как Synchro Pro. Однако, подобные инструменты в большей степени основаны на производстве изделий в среднем, т.е. поставленных на поток, которые не дают проектировщику необходимой информации об изменении издержек при принятии различных проектировочных решениях.

Для более точного определения стоимости при принятии различных проектировочных решений, необходимо доскональное перенесение проектировочной информации из информационной модели и ее детальный анализ с учетом трудоемкости изготовления узлов, так как это реализовано в предложенном Я. Хаапио инструменте расчета стоимости и выбросов углекислого газа JouCO2Costi [11].

Создание модели усложняется необходимостью в более детальной информации. В таком случае необходимы знания профессионалов в разных отраслях. Функции затрат используемые в исследовании взяты из работы Я. Хаапио [11]. Прикладной прототип программы был выполнен в исследовательском проекте “7D Design of steel structures” Тамперского Технологического Университета в 2007-2009.

2.2 Алгоритм комплексного анализа рамных каркасов

Расчет начинается с построение расчетной схемы каркаса здания. Задаются материал, сечения каркаса. Определяются в результате сбора расчетные значения вертикальных и горизонтальных нагрузок, действующие на раму.

Следующим этапом является анализ рамы с точки зрения характеристик устойчивости и динамики на предлагаемой далее упрощенной модели с приведенной жесткостью.

Далее необходимо подобрать конструкцию узла, при этом обеспечивая жесткость узла, равную полученной оптимальной жесткости, и предельный момент узла.

Глава 3. Анализ влияния жесткостных характеристик узлов рам на напряженно-деформированное состояние каркасных зданий

3.1 Описание алгоритма анализа рамы каркаса и вывод формулы оптимальной жесткости

В данном параграфе проводится анализ рамы на упрощенной модели и произведен вывод формулы оптимальной конечной жесткости.

Приведенная методика комплексного анализа поперечных рам каркасных зданий позволит проектировщику подобрать оптимальную жесткость узлов, что позволит значительно сократить расход материалов, уменьшить вес каркаса, сократить выбросы углекислого газа, при этом уровень надежности может быть увеличен за счет более точного анализа работы каркаса и возможности варьировать жесткостные характеристики, тем самым добиваясь более равномерного участия элементов конструкции в восприятии внешних нагрузок.

Изгибная жесткость узла характеризуется ее характеристикой «момент-поворот». Классификация узлов по данным характеристикам представлена на рис. 1. Согласно Еврокоду [25] данная кривая представляется в виде упрощённой билинейной зависимостью (рис.2).

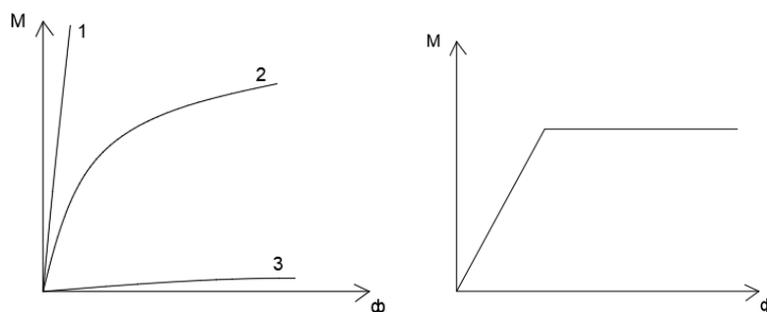


Рис. 2. Модели характеристики конечной жесткости узла соединения балок и колонн: 1- жесткий узел, 2- полужесткий узел, 3- шарнирный узел (слева) и упрощенная билинейная зависимость полужесткого узла (справа).

Рассмотрим многоэтажная многопролетная рама для определения оптимальной жесткостной характеристики узлов каркаса. Расчетная схема представлен на рис. 3.

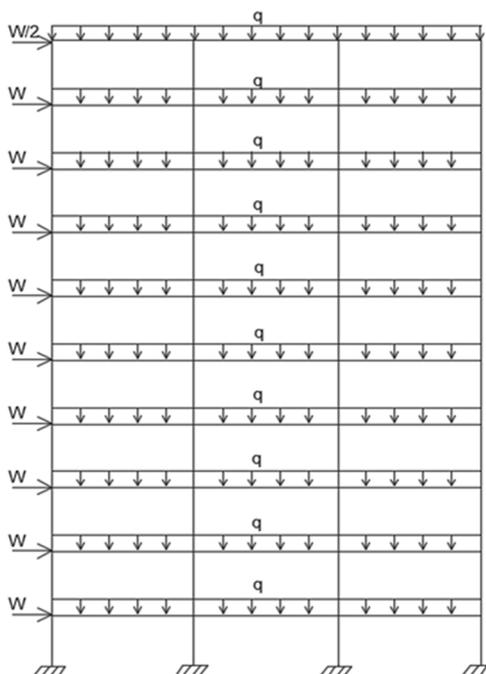


Рис. 3. Пример общего вида расчетной схемы

Рассматривается абсолютно – жесткое соединение колонн с основанием. Узлы колонн и ригелей имеют конечную жесткость S .

Для многоэтажной многопролетной рамы каркасного здания можно получить оптимальную жесткость узлов с точки зрения наиболее равномерного распределения моментов при восприятии вертикальных и горизонтальных нагрузок путем рассмотрения часть рамы, состоящей из балки первого этажа слева и справа присоединенной к колоннам 1 и 2 этажа через связь конечной жесткости. Граничные условия данной задачи могут быть представлены на рис.2, где равномерно распределенная нагрузка q и приведенная эквивалентная ветровая нагрузка W , которая прикладывается как сосредоточенная к узлу балки. Формула приведения нагрузки от

вышележащей части каркаса, из условия равных жесткостей всех колонн и с допущением о равномерном распределении нагрузки между колоннами, может быть рассчитана по формуле $W(n-1)/m$. Колонны жестко закреплены в уровне фундамента. Верхний узел колонны закреплен от перемещения по оси Z и от поворота в плоскости рамы. Решение получено с помощью метода перемещения и принимая во внимание критерий оптимальности: равенство моментов в узле и в пролете, была получена в дальнейшем формула конечной жесткости (1). Оптимальная жесткость узла достигается при равенстве моментов в середине пролета ригеля и в более нагруженном узле.

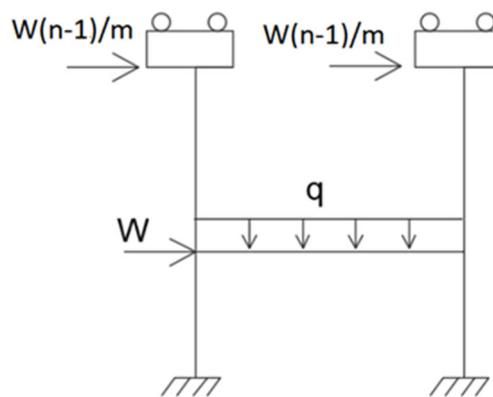


Рис. 4. H-образная рама

Матрица жесткости R выглядит следующим образом

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{bmatrix}$$

$$r_{12} = r_{21} = 0$$

$$r_{31} = r_{13} = 0$$

$$r_{25} = r_{52} = 0$$

$$r_{45} = r_{54} = 0$$

$$r_{34} = r_{43} = 0$$

$$r_{11} = \frac{48EIc}{h^3}$$

$$r_{22} = 8E \cdot \frac{I_c}{h} + 4 \frac{EI}{L} \cdot \frac{1 + \left(\frac{3 \cdot EI}{C \cdot L}\right)}{1 + 8 \cdot \frac{EI}{C \cdot L} + 12 \left(\frac{EI}{C \cdot L}\right)^2}$$

$$r_{33} = 8E \cdot \frac{I_c}{h} + 4 \frac{EI}{L} \cdot \frac{1 + \left(\frac{3 \cdot EI}{C \cdot L}\right)}{1 + 8 \cdot \frac{EI}{C \cdot L} + 12 \left(\frac{EI}{C \cdot L}\right)^2}$$

$$r_{44} = \frac{12EIc}{h^3}$$

$$r_{55} = \frac{12EIc}{h^3}$$

$$r_{23} = r_{32} = -2 \frac{\frac{EI}{L}}{1 + 8 \cdot \frac{EI}{C \cdot L} + 12 \left(\frac{EI}{C \cdot L}\right)^2}$$

$$r_{35} = r_{53} = \frac{-6EIc}{h^2}$$

$$r_{51} = r_{15} = \frac{12EIc}{h^3}$$

$$r_{42} = r_{24} = \frac{-6EIc}{h^2}$$

$$r_{41} = r_{14} = \frac{-12EIc}{h^3}$$

Столбец внешних нагрузок выглядит следующим образом

$$P = \begin{pmatrix} -W \\ \frac{qL^2}{12} \cdot \frac{6 + C \cdot \frac{L}{EI}}{8 + C \cdot \frac{L}{EI} + 12 \frac{EI}{CL}} \\ \frac{qL^2}{12} \cdot \frac{6 + C \cdot \frac{L}{EI}}{8 + C \cdot \frac{L}{EI} + 12 \frac{EI}{CL}} \\ Wn \\ -Wn \end{pmatrix}$$

Решение системы разрешающих уравнений метода перемещений позволяет получить формулу (1) для оценки в первом приближении оптимальной жесткости узлов соединений элементов каркаса

$$S_{opt} = \frac{\sqrt{20 \cdot g^2 \cdot w \cdot A + 9 \cdot B^2} - 3 \cdot (B + 4 \cdot w \cdot g)}{-g \cdot A + 6 \cdot (B - 4t)} \cdot \frac{3 \cdot E \cdot Ic}{h} \quad (1)$$

$$\text{Где } w = -q \cdot \frac{L}{W};$$

$$g = \frac{L}{h};$$

$$t = 4n + 1;$$

n – отношение числа этажей здания к числу пролетов

L – длина пролета

h – высота этажа;

q – распределенная нагрузка на ригель;

W – ветровая нагрузка;

Ic – момент инерции колонны;

Ib – момент инерции балки.

Коэффициенты A и B вычисляются по следующим формулам:

$$A = 5 \cdot w \cdot \frac{g^2}{z^2} + 9 \cdot w \cdot \frac{g}{z} - 90 \cdot \frac{t}{z} \quad (2)$$

$$B = 10t + 3gw \quad (3)$$

Полученная формула не дает точного значения оптимальной жесткостной характеристики узлов каркаса, а всего лишь дает приближенное значение. С инженерной точки зрения получаемое отклонение от глобального

минимума можно считать хорошим приближением к оптимальному варианту [26].

Для отдельной выборки узлов было показано, что оптимальная жесткость достигается при равенстве моментов в середине пролета ригеля и момента в узле ригеля с колонной.

Таблица 1. Результаты расчета

Тип узла	$S_{ini}(kN/rad)$	$M1(kN*m)$	$M2(kN*m)$	$M3(kN*m)$	C, €
Шарнирный	700	302.3	25.2	1037.8	27074
Полужесткий 1	4700	249.03	133,8	785.5	23930
Оптимальный	10800	197,1	197,4	532.9	21986
Полужесткий 2	55000	144,9	257,2	386.2	23756
Жесткий	250000	116,1	320,8	282.6	25654

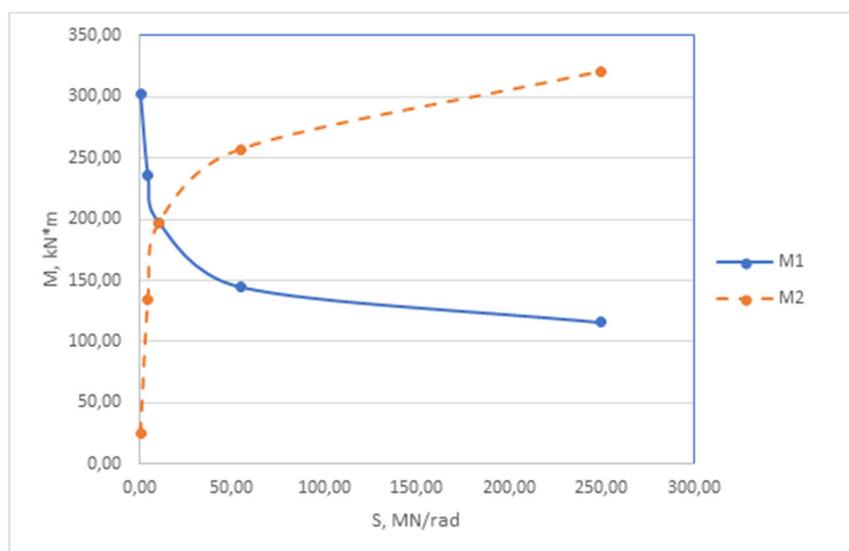


Рис. 5. График моментов в середине ригеля и узле колонны в зависимости от жесткости узла

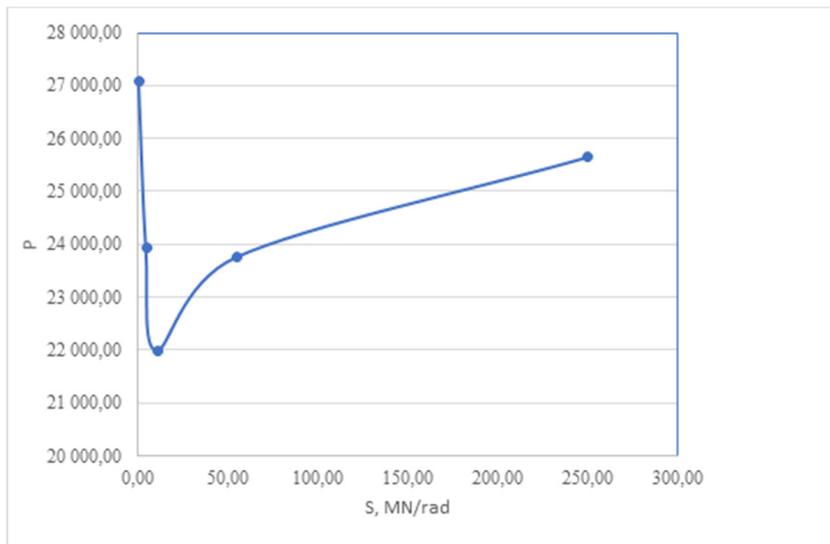


Рис. 6. График стоимости каркаса в зависимости от жесткости узла

Как видно из графика, оптимальная жесткость, определенная по формуле (1) дает минимальную стоимость каркаса.

Результаты подбора сечений при многоэтажной стальной раме с узлами с оптимальной жесткостью, представлены на рис.6

	IPE 330	IPE 330	IPE 330
HEB 200	IPE 330	IPE 330	IPE 330
HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200
HEB 200	IPE 330	IPE 330	IPE 330
HEB 200	HEB 220	HEB 220	HEB 200
HEB 220	IPE 330	IPE 330	IPE 330
HEB 220	HEB 240	HEB 240	HEB 220
HEB 240	IPE 330	IPE 330	IPE 330
HEB 240	HEB 280	HEB 280	HEB 240
HEB 240	HEB 300	HEB 300	HEB 240
HEB 260	IPE 330	IPE 330	IPE 330
HEB 260	HEB 320	HEB 320	HEB 260
HEB 280	IPE 330	IPE 330	IPE 330
HEB 280	HEB 400	HEB 400	HEB 280
HEB 300	IPE 330	IPE 330	IPE 330
HEB 300	HEB 500	HEB 500	HEB 300

Рис. 7. Результаты подбора сечений рамы узлами с оптимальной жесткостью

3.2 Исследование оптимального решения с точки зрения распределения моментов при детальном анализе влияния жесткости узлов соединения на устойчивость элементов

Для определения коэффициента расчетной длины μ для колонн 1 этажа в плоскости $X_1O_1Z_1$ по методу из СП16.13330-2017 для модели с жёсткими сопряжением балок и колонн.

Коэффициент расчётной длины колонн μ для модели с жёсткими сопряжениями балок и колонн рассчитывается в программе «Кросс», в разделе «Расчётные длины». Определим его отдельно для колонн 1 этажа, для колонн средних этажей, для колонн верхнего этажа.

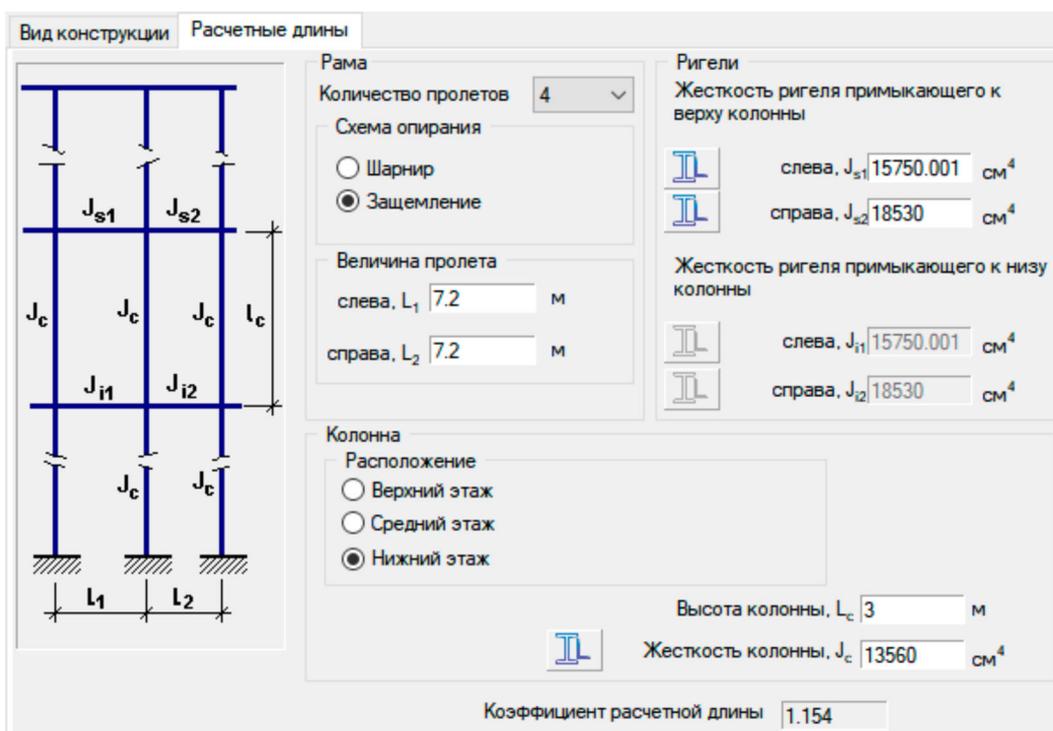


Рис. 8. Результаты расчета коэффициента расчетной длины μ для колонн 1 этажа в плоскости $X_1O_1Z_1$ по методу из СП16.13330-2017

В случае учета конечной жесткости узлов каркаса возможно найти коэффициенты расчётной длины для полужёсткой модели. Коэффициенты расчётной длины элементов постоянного сечения с упругими закреплениями концов следует определять по формулам таблицы 24 из СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования», руководствуясь общими положениями п. 8.1.

Для колонн первого этажа задействуем обобщённую расчётную схему в первой строчке табл. 24.

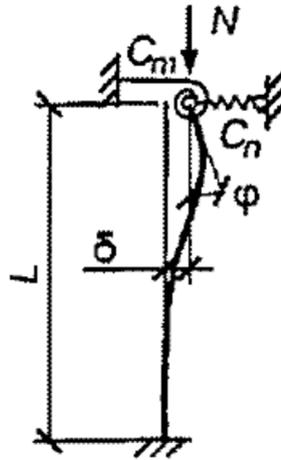


Рис. 9. Модели Морт, М3, М4, М5 (полужёсткие). Обобщённая расчётная схема для нахождения μ

$$\mu = \sqrt{\frac{n_1 \cdot (0.25 \cdot n + 1.2) + 5.4 \cdot (n + 4)}{n_1 \cdot (n + 2.4) + 5.4 \cdot (n + 1)}} \quad (4)$$

$$n = \frac{C_m \cdot h}{E \cdot O}$$

$$n_1 = \frac{C_n \cdot h^3}{E \cdot O}$$

C_m – коэффициент жёсткости упругого защемления, равный значению реактивного момента, возникающего в опорном сечении при повороте его на угол, равный 1.

C_n – коэффициент жёсткости упругого защемления, равный значению реактивного момента, возникающего в опорном сечении при повороте его на угол, равный 1. Так как $C_n=0$ при допущении, что жесткость колонн распределена равномерно по всем осям, то формула (4) принимает вид:

$$\mu = \sqrt{\frac{n + 4}{n + 1}} \quad (5)$$

Для нахождения C_m необходимо реактивный момент, который передается от балок на верхний узел колонны 1 этажа, поделить на угол, на который поворачивается её верхний узел. Рассмотрим усилия и деформации в колонне 1 этажа по оси 4 (элемент №37).

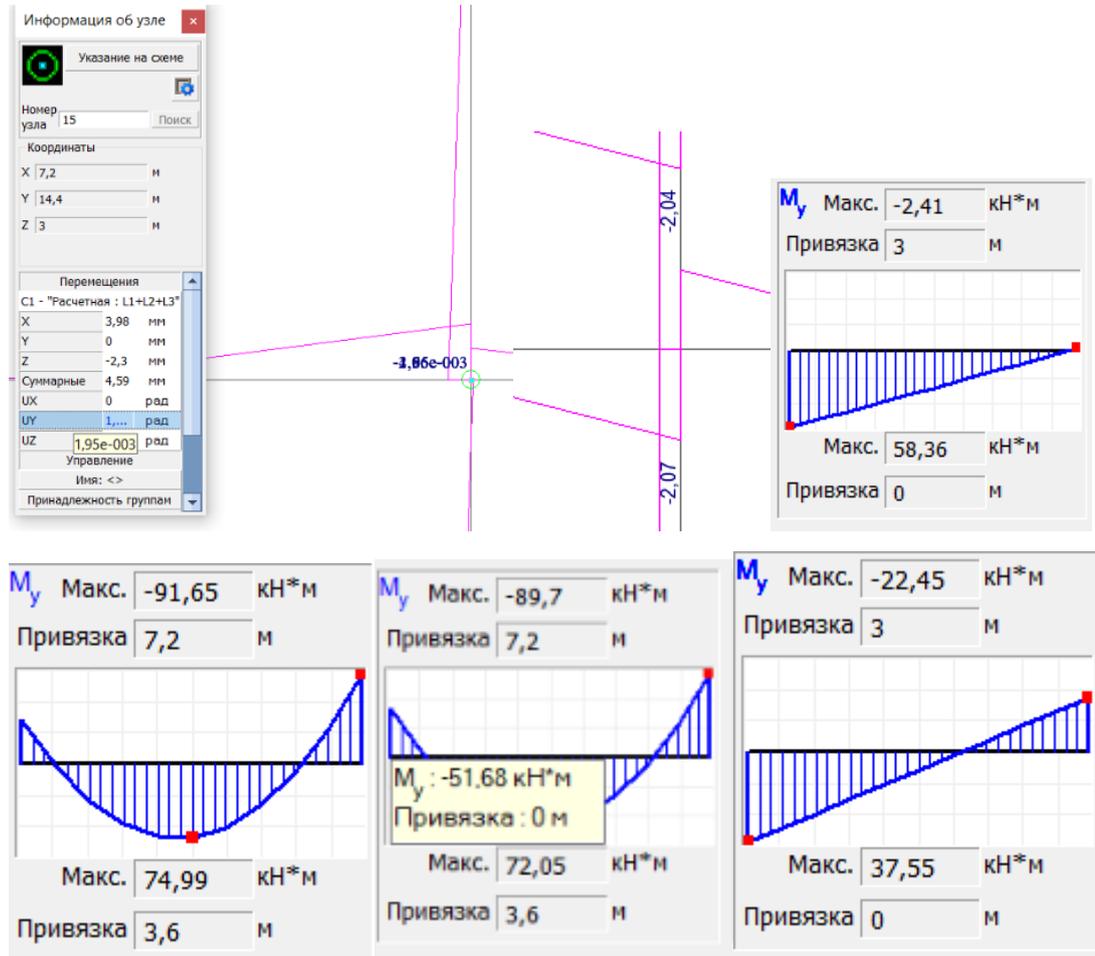


Рис. 10. Модель Морт. Перемещения верхнего узла колонны 1 этажа, эпюра моментов и поперечных сил(продольные силы в балках приняты равными 0). Поворот верхнего узла колонны первого этажа и эпюра изгибающего момента M_y для балки слева(M_1) и справа(M_2), а также для колонны 2 этажа(M_3)

$$C_m = \frac{M_4}{\theta} = \frac{-51.68 - (-91.65) + (-37.55)}{0.00195} = 1241.0 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$$

$$C_n = \frac{Q_4}{x} = \frac{2.07}{0.00398} = 520.1 \text{ кН/м}$$

$$n = \frac{C_m \cdot h}{E \cdot O} = \frac{1241.0 \cdot 3}{210000000 \cdot 0.0002093} = 0.085$$

$$n_1 = \frac{C_n \cdot h^3}{E \cdot O} = \frac{520.1 \cdot 3^3}{210000000 \cdot 0.0002093} = 0.32$$

$$\mu = \sqrt{\frac{n_1 \cdot (0.25 \cdot n + 1.2) + 5.4 \cdot (n + 4)}{n_1 \cdot (n + 2.4) + 5.4 \cdot (n + 1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.32 \cdot (0.25 \cdot 0.085 + 1.2) + 5.4 \cdot (0.085 + 4)}{0.32 \cdot (0.085 + 2.4) + 5.4 \cdot (0.085 + 1)}} = 1.837$$

Табл. 24 [2] не располагает расчётными случаями для средних и верхних колонн в раме с полужёсткими узлами, поэтому найдём приближённые значения остальных коэффициентов расчётной длины с помощью интерполяции и известных коэффициентов из модели М1 (табл. 2).

Аналогично поступим для модели М5. Коэффициенты расчётной длины для моделей М3, М4 найдём методом линейной интерполяции, взяв крайние значения из таблиц 4 и 5.

Таблица 1. Результаты расчета

Характеристика	М1	М5	М4	М3	Мopt	М2
Поворотная жёсткость узла сопряжения балки с колонной $U_y, \frac{\text{Г} \cdot \text{М}}{\text{рад}}$ (Stiffness)	∞	15000	10000	5000	1942	0
Вес металлоконструкции, найденный в Tekla (Weight), т	26.758	27.712	28.060	27.867	26.142	32.242
Момент в максимально нагруженной балке $M_{y_MaxBeam1}, \text{Г} \cdot \text{М}$	-13.54	-12.18	-11.81	-10.88	-9.72	14.66

3.3 Определение перемещений каркаса

Сведем многоэтажный каркас, изображенный на рис 7 к приведенному консольному вертикальному стержню, высотой равной высоте сооружения Н.

Функционал для данной системы выглядит следующим образом:

$$L(u) = \int_0^l \left(\frac{1}{2} \cdot E \cdot I \cdot u''^2 + \frac{1}{2} \cdot k \cdot u'^2 - q \cdot u \right) dx$$

$$F(u) = \int_0^l \left(\frac{1}{2} \cdot E \cdot I \cdot u''^2 + \frac{1}{2} \cdot k \cdot u'^2 + \frac{1}{2} \cdot N \cdot u'^2 \right) dx = 0$$

$$\Gamma(u) = \int_0^l \left(\frac{1}{2} \cdot E \cdot I \cdot u''^2 + \frac{1}{2} \cdot k \cdot u'^2 \right) dx - \omega^2 \int_0^l \rho \cdot u'^2 dx = 0$$

$$\delta = \frac{u_s - u}{u_s} = \frac{0.114 - 0.109}{0.114} \cdot 100\% = 4.4\%$$

В данной работе рассматривается следующая функция формы:

$$u(x) = \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cdot \cos \frac{\pi x}{H_0}$$

$$H_0 = \mu H$$

Воспользуемся методом Ритца. Вариационная постановка задачи выглядит следующим образом:

$$L(u) \rightarrow \min$$

$$u(0) = 0$$

Тогда получим параметр а:

$$a = \frac{8 \cdot \pi \cdot H_0^5 \cdot q_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{H_0}\right) - 8 \cdot \pi^2 \cdot x \cdot H_0^4 \cdot q_0}{2 \cdot \pi^6 \cdot E \cdot x \cdot I_0 + 2 \cdot \pi^4 \cdot x \cdot H_0^2 \cdot k_0 - \pi^3 \cdot H_0^3 \cdot k_0 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{H_0}\right) + \pi^5 \cdot E \cdot H_0 \cdot I_0 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{H_0}\right)}$$

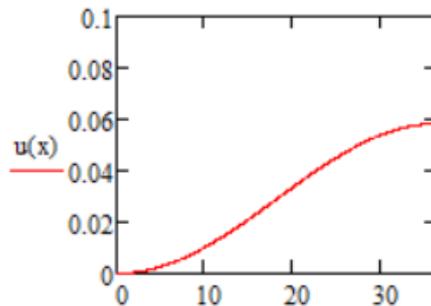


Рис. 11. Результаты расчета горизонтально перемещения на высоте x

По скаду получилось 0,114 м горизонтальное перемещение верхнего этажа. Погрешность $(0,114-0,119)/0,114=0.043=4,3\%$

Данным подходом могут быть решены задачи устойчивости и динамики конструкции, с помощью той же функции формы.

3.4 Влияние учета конечной жесткости на динамические характеристики

Исходя из методики определения коэффициента динамичности по СП14.13330-2017:

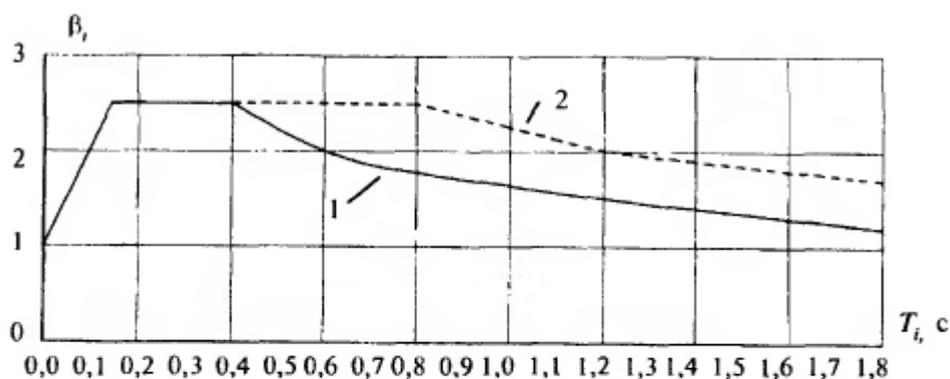


Рисунок 2

Для грунтов категорий I и II по сейсмическим свойствам (кривая 1) при:

$$T_i \leq 0,1 c \quad \beta_i = 1 + 15 T_i;$$

$$0,1 c < T_i < 0,4 c \quad \beta_i = 2,5;$$

$$T_i \geq 0,4 c \quad \beta_i = 2,5(0,4 / T_i)^{0,5};$$

Рис. 12. Коэффициент динамичности СП14.13330-2017

Из рисунка видно, что однозначно сформировать условия оптимальности по динамике невозможно. Необходим итеративный расчет, позволяющий скорректировать собственные частоты для оптимальной жесткости, с целью уменьшения коэффициента динамичности.

3.4 Многокритериальная оптимизация

Также предлагается модель консольного стержня на упругом основании с жесткостью на поворот, эквивалентная работе всего каркаса. Для расчета жесткости основания необходимо решить балку с длиной пролета $l/2$ (где l – длина пролета в каркасе) и со следующими граничными условиями: слева жесткая заделка, к которой балка присоединена через упругую связь жесткостью S (испытывает поворот на 1 рад.), справа шарнирно-подвижная опора. Итого формула эквивалентной жесткости будет определяться по формуле:

$$S_{eq} = \frac{12 \cdot E \cdot I \cdot S}{l \cdot S + 6 \cdot E \cdot I} \quad (5)$$

Где S – жесткость соединения узлов,

E – модуль упругости

I – момент инерции

l – длина пролета

Интенсивность эквивалентной жесткости может быть получена отнесением жесткости к высоте этажа h :

$$s_{eq} = \frac{S_{eq}}{h} \quad (5)$$

На рисунке 1 представлена последовательность проведения оптимизации.

1. Получение оптимальной жесткости с точки зрения распределения моментов. Статический расчет нескольких вариантов жесткости, близких к оптимальной.
2. Проверка на максимальные прогибы балок и крен сооружения (по формуле, полученной в данной работе). Установка ограничений по 2 группе предельных состояний.
3. Проверка на устойчивость элементов рамы.
4. Учет динамических характеристик и поиск минимального коэффициента динамичности
5. Расчет стоимости вариантов

Верификация оптимальности жесткости с точки зрения распределения усилий и устойчивости колонн произведено на 81 схема с различной горизонтальной нагрузкой, длиной пролетов и горизонтальной нагрузкой. Результаты расчета и подбора профилей показывают, что оптимальная жесткость, подобранная по предлагаемой методике дает наименьшую материалоемкость рамы.

Приведенный в работе анализ результатов научно-исследовательских работ по данной теме, позволяет сделать вывод, что представленная методика дает возможность наиболее точно произвести анализ работы каркаса и при этом наиболее просто подобрать оптимальные жесткостные характеристики

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе были выбраны критерии оптимальности. Поиск оптимального решения основан на минимизации моментов в горизонтальных конструкциях рам каркасных зданий, повышении устойчивости ее элементов и учет влияния жесткости на динамические характеристики;

2. Была получена формула для приближенной оценки оптимальной жесткостной характеристики узла каркаса и произведена ее проверка на серии рам с различными параметрами геометрии, жесткости, этажности, количеством пролетов и соотношением горизонтальной и вертикальной нагрузки;

3. Был предложен алгоритм комплексного анализа и многокритериальной оптимизации рамы каркаса здания при варьировании конечной жесткости узлов и элементов.

IV. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев С. В., Ключев А. В. Оптимальное проектирование конструкций с учетом устойчивости равновесия //Фундаментальные исследования. – 2008. – №. 9.
2. Ключев С. В., Ключев А. В. Оптимальное проектирование строительных конструкций на основе эволюционных и генетических алгоритмов. – 2011.
3. Ключев С. В., Ключев А. В. Оптимальное проектирование стержневых систем на основе энергетического критерия при силовых и температурных воздействиях с учетом безопасной устойчивости //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2009. – №. 1. – С. 60-63.
4. Walport F., Gardner L., Real E., Arrayago I., Nethercot D. A. (2019) «Effects of material nonlinearity on the global analysis and stability of stainless steel frames», Journal of Constructional Steel Research. doi: 10.1016/j.jcsr.2018.04.019.
5. Nethercot, D. A. (2000) «Frame structures: Global performance, static and stability behaviour: General Report», Journal of Constructional Steel Research. doi: 10.1016/S0143-974X(99)00080-2.
6. Nethercot D. A., Salih E. L. and Gardner L. 2011 Behaviour and Design of Stainless Steel Bolted Connections Adv. Struct. Eng. 14 647–58
7. Frye H.J .. Morris G.A .. (1975): Analysis of Flexibly Connected Steel Frames. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.2 . pp. 280 - 291 -
8. Jaspart J.P .. Haquoi R .. (1990): Guidelines for the Design of Braced Frame with Semi-Rigid Connections. International Colloquium Stability of Steel Structuree. Vol.II. Budapest, pp. 197-204 -
9. Kishi N .. Chen W. F .. (1989): Data Base of Steel Beam-to-Column Connection. AISC Engineering Journal. Vol.24. pp . 89-106

10. Наарю J., Heinisuo M. Minimum cost steel beam using semi-rigid joints //Rakenteiden Mekaniikka (J. Struct. Mech.). – 2010. – Т. 43. – №. 1. – С. 1-11.
11. Наарю, J. Feature based cost estimation of steel structures (2010) Tampere University of Technology.
12. Лихтарников Я. М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – 1979.
13. Bagautdinov R. et al. Feasibility study tool for semi-rigid joints design of high-rise buildings steel structures //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 33. – С. 02022.
14. Каленов В.В., Павлов А.Б. Влияние болтовых соединений на поведение конструкций. Монтажные и специальные работы в строительстве, 1989, No9.
15. Pavlov A. Determination of Efficiently of Beam-to-Column Joints. Metal Structures. The 9th International Conference. -Krakow, 1995.
16. Pavlov A. Determination of Buckling Length of Column with Semi-Rigid Joints. Stability of Steel Structures. International Colloquium. Budapest, 1995.
17. Городецкий А. С., Барабаш М. С. Учет нелинейной работы железобетона в ПК ЛИРА-САПР. Метод «Инженерная нелинейность» //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2016. – Т. 12. – №. 2. – С. 92-98.
18. Городецкий А. С., Барабаш М. С. Учет нелинейной работы железобетонных конструкций в практических расчетах. – 2014.
19. Heinisuo M. et al. Multi-criteria optimization and decision making for single family house //14th International conference on computing in civil and building engineering. – 2012. – С. 1-8.
20. Тененев В. А. Решение задачи многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами //Интеллектуальные системы в производстве. – 2006. – №. 2. – С. 103-109.

21. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, расчет и приложения //М.: Радио и связь. – 1992. – Т. 504. – С. 1.
22. Трифонов А. Г. Многокритериальная оптимизация //Консультационный центр MATLAB: раздел Optimization Toolbox.– Интернетресурс: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/16.php. – 2011.
23. Ланнэ А. А., Улахович Д. А. Многокритериальная оптимизация //Л.: ВАС. – 1984. – Т. 94. – С. 3.
24. Miettinen K. On the methodology of multiobjective optimization with applications Jyvaskyla. – Jyvaskyla : Univ. of Jyvaskyla, 1994.
25. European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures. – CEN, 1992.
26. Комаров, Ю., Куроедов, В., Рыбаков, В. and Багаутдинов, Р., 2020. Оптимальные Жесткостные Характеристики Узлов Металлических Конструкций: Выпускная Квалификационная Работа Магистра: Направление 08.04.01 «Строительство» ; Образовательная Программа 08.04.01_20 «Проектирование И Расчет Строительных Конструкций И Оснований». [online] Doi.org. Available at: <<https://doi.org/10.18720/SPBPU/3/2020/vr/vr20-4580>> [Accessed 15 September 2020].

V. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. R. Gilemkhanov, R. Bagautdinov, и V. Kankhva, «Autodesk Revit and Robot Structural Analysis in Design of Framed Buildings», в *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-70987-1_112.
2. R. Bagautdinov, D. Monastireva, I. Bodak, и I. Potarova, «Feasibility study tool for semi-rigid joints design of high-rise buildings steel structures», в *E3S Web of Conferences*, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20183302022.
3. Bagautdinov, R.I., Komarov, Y.P., Mostovskiy, N.N., Daurov, Z.S.: Numerical model of Beam-to-column finite stiffness. Vestn. MGSU. (2019). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.2.179-187>.
4. V. Lalin, R. Bagautdinov, R.I., Komarov, Ya. Agafonov, « Minimum bending moment distribution in skeletal structures», в *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 896, International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE 2020)*, 2020, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302022>.