

На правах рукописи



ПУТЕЕВА ЛАРИСА ЕВГЕНЬЕВНА

**ОПТИМИЗАЦИЯ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ
ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ
ПРИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)»

Научный руководитель:

Тухфатуллин Борис Ахатович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Гребенюк Григорий Иванович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительная механика» ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», г. Новосибирск

Панин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)», г. Томск

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский университет «Московский государственный строительный университет (МГСУ)», г. Москва

Защита состоится «04» октября 2013 года в 09 ч. 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.265.01 в Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу:

634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корп. 5, ауд. 307.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Автореферат разослан «18» июля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Копаница Н.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из важных проблем при проектировании строительных конструкций является задача экономии материальных ресурсов при обеспечении требуемого уровня надежности сооружения. Создание эффективных и экономичных конструкций возможно при разработке и широком внедрении в практику проектирования методов оптимизации. Нагрузки, действующие на сооружение, весьма многообразны. Важной практической задачей является учет действия на конструкцию многопараметрических нагрузок, каждая из которых задана пределами изменения. Выбор опасных сочетаний нагрузок зависит от соотношения жесткостей и размеров сечений, которые на этапе формирования ограничений задачи оптимального проектирования неизвестны. Полученное в ходе поиска оптимальное решение задачи, как правило, нуждается в корректировке, исходя из требований технологии изготовления. Таким образом, задача оптимального проектирования сечений плоских стержневых систем при многопараметрическом нагружении с учетом действующих норм проектирования, конструктивных и технологических требований, является актуальной.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой № 1.1.08 РосОбразования «Разработка новых направлений в теории взаимодействия материалов машин и механизмов со средой с целью повышения прочностных характеристик и понижения материалоемкости конструкций», госбюджетной темой № 7.4786 Министерства образования и науки РФ «Развитие теории проектирования сооружений минимальной материалоемкости на основе оптимальных систем».

Объект исследования – упругие плоские стержневые системы с поперечными сечениями, заданными с точностью до четырех параметров. Многопараметрические нагрузки, действующие на стержневую систему, заданы пределами изменения.

Предмет исследования – создание эффективных алгоритмов оптимизации сечений элементов плоских стержневых систем и исследование свойств полученных оптимальных систем в случае одно- и многопараметрического нагружения.

Цель диссертации заключается в обосновании и разработке метода оптимального проектирования сечений элементов плоских стержневых систем, находящихся под действием многопараметрической нагрузки при учете ограничений по прочности, жесткости, общей и местной устойчивости и конструктивных требований.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- разработать алгоритм оптимизации сечений элементов плоских стержневых систем при однопараметрическом нагружении;
- разработать алгоритм оптимизации сечений элементов плоских стержневых систем при многопараметрическом нагружении;
- разработать алгоритм определения оптимальных размеров центрально-сжатого, изгибаемого и сжато-изгибаемого стержней с учетом требований норм проектирования;
- разработать алгоритм определения опасных сочетаний нагрузок по общей устойчивости при заданном соотношении между моментами инерции;
- выявить основные свойства систем, полученных при решении задач оптимального проектирования;
- исследовать точность и сходимости вычислительных алгоритмов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан новый вариант реализации метода направленного поиска оптимального соотношения жесткостей элементов плоских стержневых систем при действии однопараметрической нагрузки, не требующий аппроксимации усилий, перемещений, критических сил в функции от размеров поперечных сечений;
- разработан метод оптимизации сечений элементов плоских стержневых систем при действии многопараметрической нагрузки, позволяющий отыскивать систему с оптимальным соотношением жесткостей из множества допустимых;
- разработан метод определения опасных сочетаний нагрузок по общей устойчивости, позволяющий избежать полного перебора всех возможных сочетаний нагрузок.

Практическая значимость работы:

- обоснованы алгоритмы оптимизации сечений элементов плоских стержневых систем, позволяющие получать технологичные в изготовлении конструкции с меньшим расходом материала по сравнению с реализованными аналогами;

- получены новые результаты решения задач оптимального проектирования плоских стержневых систем и отдельных стержней;
- разработан единый алгоритм оптимизации центрально-сжатых, изгибаемых, сжато-изгибаемых стержней с поперечным сечением в виде составного двутавра с двумя осями симметрии с учетом СНиП-II-23-81* «Стальные конструкции»;
- разработанные в диссертации алгоритмы реализованы в комплексе программ для оптимального проектирования плоских стержневых систем при одно- и многопараметрическом нагружении.

Реализация результатов исследований:

Результаты работы в виде методик, алгоритмов и программ внедрены в ООО «Стройтехинновации ТДСК» (ООО «СТИ ТДСК»), ООО «Архпроектсервис», в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ТГАСУ).

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, выборе методов их решения, разработке алгоритмов оптимального проектирования и поиска опасных сочетаний нагрузок по общей устойчивости, проведении численных экспериментов и обобщении результатов исследований.

Достоверность основных положений подтверждается использованием апробированных методов оптимизации и численных методов расчёта стержневых систем, а также сравнением результатов с решением тестовых задач, полученных другими авторами.

На защиту выносятся:

- метод оптимального проектирования плоских стержневых систем при многопараметрическом нагружении, основанный на разделении исходной задачи на два уровня с варьированием двумя независимыми группами переменных;
- алгоритм определения оптимальных размеров центрально-сжатых, изгибаемых и сжато-изгибаемых стержней с учетом требований норм проектирования;
- алгоритмы поиска опасных сочетаний нагрузок по общей устойчивости;
- результаты оптимального проектирования плоских стержневых систем и отдельных стержней.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на: научно-технической конференции «Архитектура и строительство» (г. Томск, 1999 г.); III Всероссийском семинаре «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирск, 2000 г.); I Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирск, 2008 г.); Международной конференции RELMAS-2008 «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» (Санкт-Петербург, 2008 г.); Международной научно-практической конференции «Строительство-2011» (Ростов н/Д, 2011 г.); II международной научно-практической конференции МНИЦ ПГСХА «Строительная индустрия: вчера, сегодня, завтра» (Пенза, 2011 г.).

Публикации

По материалам диссертационных исследований опубликовано 9 работ, 2 публикации в издании, включенном в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 208 наименований. Работа изложена на 143 страницах и содержит 35 рисунков, 42 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе производится анализ проблемы проектирования оптимальных плоских стержневых систем при учете ограничений по прочности, жесткости, общей и местной устойчивости и конструктивных требований.

Значительный вклад в развитие теории оптимального проектирования внесли труды отечественных и зарубежных ученых: Н.И. Абрамова, А.И. Виноградова, В.Н. Гордеева, Г.И. Гребенюка, И.Б. Лазарева, Л.С. Ляховича, Е.Л. Николаи, А.В. Перельмутера, В.А. Пермякова, Я. Ароры, Б. Карихало, М. Леви, Н. Ольхоффа, Л. Шмидта и многих других.

Вопросам проектирования систем наименьшего объема с учетом ограничений по прочности, устойчивости и частоте собственных колеба-

ний посвящены работы Т.Л. Дмитриевой, А.Ф. Елизарова, А.В. Ижэндеева, А.П. Малиновского, А.В. Мищенко, А.Б. Те, Б.А. Тухфатуллина, Ю.Я. Юдина, В.В. Юрченко, Е.В. Янькова и других исследователей.

На основе проведенного анализа работ, посвященных оптимизации плоских стержневых систем при одно- и многопараметрическом нагружении, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе выбрана целевая функция (объем материала конструкции) и записаны ограничения задачи. Предложен алгоритм решения задачи оптимального проектирования сечений элементов плоских стержневых систем, основанный на раздельном варьировании группами переменных – размерами сечений и соотношениями между моментами инерции элементов стержневой системы.

Постановка задачи: рассматриваются упругие стержневые системы с заданным очертанием осей и условиями опирания. Поперечные сечения элементов заданы четырьмя параметрами: шириной и высотой листов, из которых составлено сечение (рис. 1).

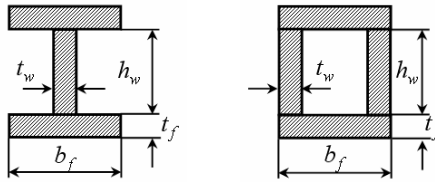


Рис. 1. Формы и размеры поперечных сечений элементов

В качестве критерия оптимальности принята функция объема материала конструкции (1). К ограничениям задачи относятся: условия прочности (2), общей и местной устойчивости (3), (4), жесткости (5). По конструктивным соображениям величины варьируемых параметров должны удовлетворять условиям (6). Нагрузки, действующие на систему, заданы пределами изменения (7).

$$V = \sum_{j=1}^{K_E} A_j \cdot \ell_j \quad (1)$$

$$\sigma_{\max, j} \leq R_y ; \tau_{\max, j} \leq R_s ; \sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_j^2 + 4\tau_j^2} \leq R_y \quad (2)$$

$$k_y \cdot |N_j| \leq F_{\text{кр}, z} ; k_y \cdot |N_j| \leq F_{\text{кр}, y} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{ст}} < \sigma_{\text{кр}, \text{ст}} ; \sigma_{\text{п}} < \sigma_{\text{кр}, \text{п}} ; \tau_{\text{ст}} < \tau_{\text{кр}, \text{ст}} \quad (4)$$

$$v \leq [v]; u \leq [u] \quad (5)$$

$$b_{f,\min} \leq b_f \leq b_{f,\max}; \quad t_{f,\min} \leq t_f \leq t_{f,\max} \quad (6)$$

$$h_{w,\min} \leq h_w \leq h_{w,\max}; \quad t_{w,\min} \leq t_w \leq t_{w,\max}$$

$$F_{j,\min} < F_j < F_{j,\max} \quad (7)$$

где: A_j, ℓ_j – площадь поперечного сечения и длина j -го стержня;

$N_j, F_{кр,z}, F_{кр,y}$ – продольная сила, критическая сила в плоскости и из плоскости j -го сжатого стержня;

v, u – перемещения узлов стержневой системы по вертикали и горизонтали;

$[v], [u]$ – предельные перемещения узлов.

Для формирования ограничений (2)–(5) задачи оптимального проектирования необходимо определить внутренние усилия, перемещения, критические силы, коэффициенты приведения длины сжатых стержней. Для вычисления этих величин использован метод конечных элементов (МКЭ).

Для разработки алгоритма решения задачи (1)–(7) предварительно рассмотрим случай действия на стержневую систему однопараметрической нагрузки.

При изменении в ходе оптимизации размеров сечений для статически определимых систем необходимо заново определять параметры состояния: перемещения и критические силы, а для статически неопределимых – внутренние усилия, перемещения и критические силы. Основная сложность при решении поставленной задачи оптимизации (1)–(6) заключается в том, что внутренние усилия, перемещения и критические силы зависят от размеров поперечных сечений, которые на этапе формирования ограничений неизвестны. Выразить требуемые для записи ограничений величины в виде явной функции от варьируемых параметров сечений, как правило, не удастся. Производить прямой расчет системы всякий раз, когда варьируемые параметры в ходе оптимизации изменяются, даже для современной вычислительной техники, неэффективно. В диссертационной работе использован другой подход, развивающий способ лучевых проекций, предложенный Н.И. Абрамовым.

Усилия, перемещения, критические силы, необходимые для проверки ограничений задачи (2)–(5) на каждом шаге оптимизации зависят от соотношений между моментами инерции сечений. Изменение размеров сечений с одновременным сохранением соотношений между моментами инерции не требует перерасчета стержневой системы, что даёт возможность создавать эффективные алгоритмы оптимизации.

При записи ограничений по общей устойчивости (3) и жесткости (5) необходимо учитывать жесткости всех конечных элементов (КЭ), образующих стержневую систему. Для формирования ограничений по прочности (2) и местной устойчивости (4) требуется знать внутренние усилия и коэффициенты приведения длины сжатого стержня только для рассматриваемого КЭ. В соответствии с этим замечанием разделим ограничения задачи оптимального проектирования (1)–(6) на две группы:

- ограничения по общей устойчивости и жесткости (3), (5);
- ограничения по прочности, местной устойчивости, конструктивные требования (2), (4), (6).

Введем в рассмотрение две группы варьируемых параметров:

- вектор соотношений моментов инерции

$$\gamma^* = \{\gamma_1^*, \gamma_2^*, \dots, \gamma_{KG}^*\}^T; \quad (8)$$

- матрицу размеров поперечных сечений

$$[x^*] = \begin{bmatrix} b_{f1} & b_{f2} & \dots & b_{fKG} \\ t_{f1} & t_{f2} & \dots & t_{fKG} \\ h_{w1} & h_{w2} & \dots & h_{wKG} \\ t_{w1} & t_{w2} & \dots & t_{wKG} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Элементы стержневой системы с одинаковыми размерами поперечных сечений объединяются в группы, относящиеся к одному типу жесткости (KG – число типов жесткости).

Рассчитав стержневую систему при заданном соотношении между моментами инерции сечений, следует найти для нее оптимальный проект, не нарушая это соотношение. Для каждого типа жесткости решается задача математического программирования: определяется минимум площади сечения при учете условий прочности, местной устойчивости и конструктивных требований. Величина момента

инерции задается из условия удовлетворения требованиям жесткости и общей устойчивости для всей стержневой системы. Если заданная величина момента инерции не позволяет удовлетворить ограничениям по прочности и местной устойчивости для данного типа жесткости, то определяется параметр пропорционального увеличения всех размеров сечений до выполнения указанных ограничений. Для определения оптимальных соотношений между моментами инерции сечений используется метод локальных вариаций. Блок-схема алгоритма показана на рис. 2, а.

Для иллюстрации работы алгоритма приведем пример оптимального проектирования рамы (рис. 2, б) при следующих исходных данных: $\ell = 6$ м; $q = 20$ кН/м; $R_y = 210$ МПа; $R_s = 120$ МПа; $k_y = 1,5$; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $10 \text{ см} \leq b_f \leq 30 \text{ см}$; $10 \text{ см} \leq h_w \leq 60 \text{ см}$; $0,6 \text{ см} \leq t_f \leq 3 \text{ см}$; $0,6 \text{ см} \leq t_w \leq 3 \text{ см}$; $[v] = 3 \text{ см}$; $[u] = 1,5 \text{ см}$.

Результаты расчета представлены в виде графика изменения функции объемов (рис. 2, в), эпюр изгибающих моментов при одинаковых жесткостях всех элементов (рис. 2, г) и при оптимальном их соотношении (рис. 2, д). По сравнению со стержневой системой с одинаковыми размерами сечений всех элементов экономия материала за счет варьирования жесткостями γ_1^* составила 29 %. Исходные данные и результаты оптимального проектирования двухэтажной рамы приведены на рис. 2, е (экономия материала составила 11 %).

В рассмотренных примерах варьирование производилось двумя типами жесткостей – ригеля и колонны. Аналогичная задача, но с увеличенной вдвое нагрузкой на междуэтажное перекрытие (рис. 3, а) решалась в четырех вариантах: жесткости не варьируются (табл. 1, строка 1); варьируются жесткости колонн и ригелей (строка 2); варьируются жесткости колонн первого и второго этажа и ригелей (строка 3); варьируются жесткости всех элементов (строка 4). Результаты расчетов представлены на рис. 3, б.

В приведенных примерах экономия материала представлена в сравнении с расходом материала на систему, все элементы которой имеют одинаковое поперечное сечение. В практике реального проектирования жесткости колонн и ригелей, как правило, различаются. По отношению к такой системе (табл. 1, строка 2) дополнительный эффект

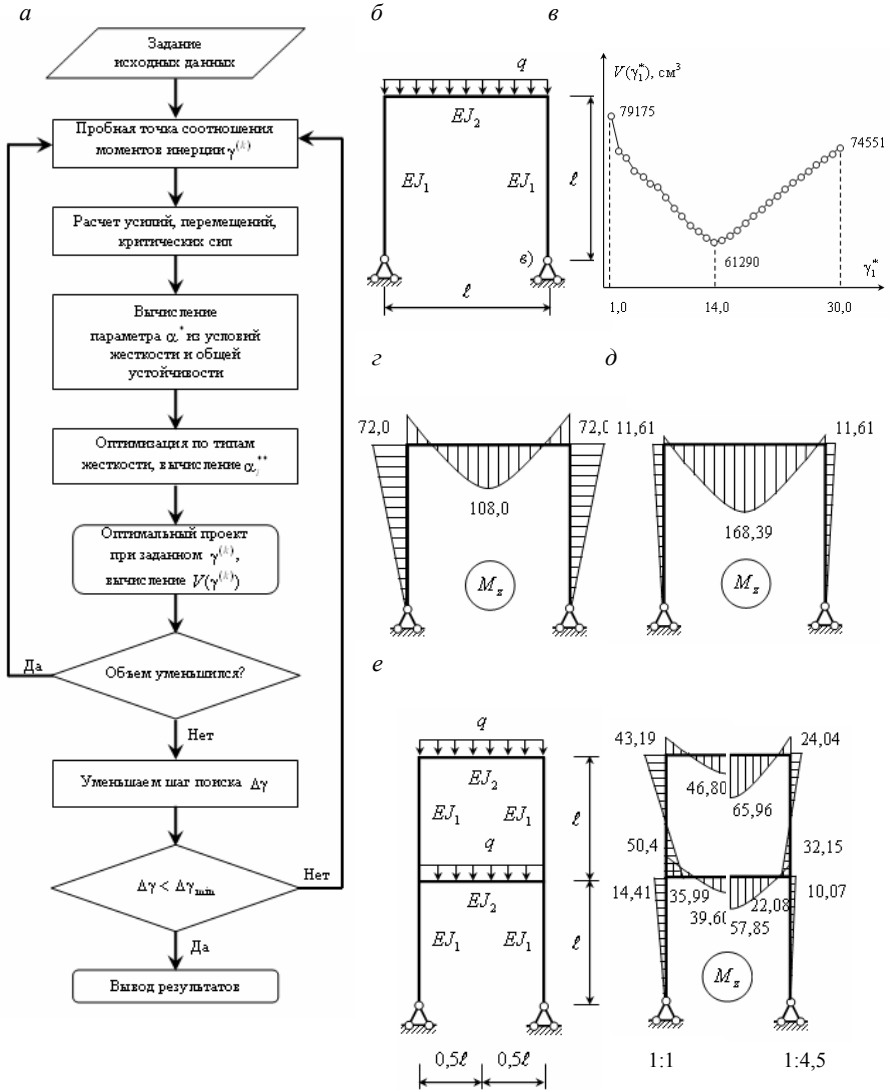


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска оптимального соотношения жесткостей (а); исходные данные и результаты оптимального проектирования – график целевой функции и эпюры изгибающих моментов для одноэтажной рамы (б–д); исходные данные и результаты решения для двухэтажной рамы (е).

за счет варьирования жесткостями всех элементов составил 9,8 %. Как показывают полученные результаты, существенной экономии материала можно добиться при варьировании небольшим количеством типов жесткости, получая достаточно технологичные проекты, отвечающие требованиям реального проектирования.

Предложенный алгоритм оптимального проектирования также реализован и для случая коробчатого поперечного сечения. Для однопролетных стержней запись всех ограничений задачи производилась в явном виде.

Таким образом, предложенная схема оптимизации, когда на верхнем уровне варьируются соотношения между моментами инерции, а на нижнем уровне – параметры сечений, не требует аппроксимации усилий, перемещений, критических сил при изменении размеров поперечных сечений.

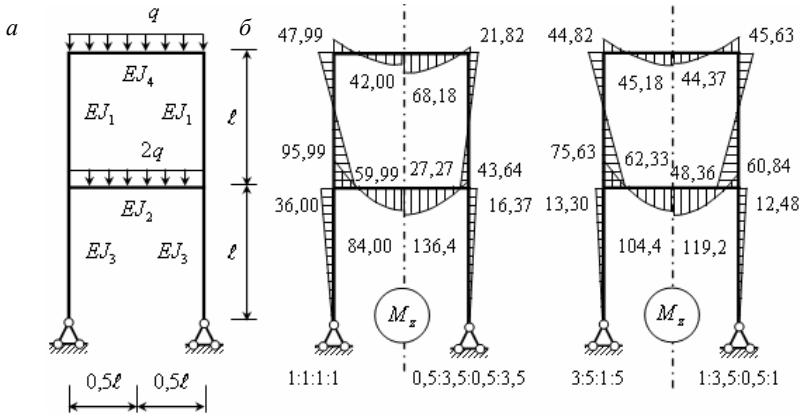


Рис. 3. Исходные данные (а) и результаты оптимального проектирования – эпюры изгибающих моментов для двухэтажной рамы при четырех различных вариантах варьирования жесткостей колонны и ригеля (б)

Таблица 1

Результаты решения задачи оптимального проектирования для двухэтажной рамы (рис. 3, а)

№	Соотношения жесткостей				Объем $V(\gamma^*)$, см ³	Экономия материала, %
	γ_1^*	γ_2^*	γ_3^*	γ_4^*		
1	1	1	1	1	144038	–
2	0,5	3,5	0,5	3,5	119254	20,8
3	3	5	1	5	119592	20,4
4	1	3,5	0,5	1	108874	32,3

В третьей главе рассмотрены вопросы выбора методов нелинейного программирования и предложены пути их реализации для решения задач оптимального проектирования центрально-сжатых, изгибаемых и сжато-изгибаемых стержней и образованных из них стержневых систем при однопараметрическом нагружении.

Для решения поставленной задачи оптимального проектирования (1)–(6) могут быть использованы различные методы условной минимизации, многие из которых не учитывают следующих особенностей решаемой задачи: целевая функция не является выпуклой (вогнутой); задача имеет большое количество ограничений различных типов, некоторые из которых не являются выпуклыми; выявить ограничения, являющиеся активными в оптимальной точке, заранее невозможно.

Для определения оптимальных размеров сечений в работе использовались методы случайного и прямого поиска. Небольшое (до четырех) число варьируемых параметров в одном поперечном сечении позволяет построить процедуру последовательного улучшения целевой функции с рассмотрением в ходе поиска большего числа пробных точек, чем это обычно принято в поисковых методах.

Стержни, из которых состоит плоская рама, находятся в условиях центрального сжатия, изгиба, либо сжатия с изгибом. Рассмотрим три частные задачи оптимизации.

Оптимизация сечений при центральном сжатии (10)–(15).

Функция цели – площадь поперечного сечения (10). Учитываются ограничения по устойчивости (11), местной устойчивости стенки и полки (12), (13), а также по предельной гибкости в плоскости и из плоскости (14), (15). Все ограничения записываются согласно требований СНиП II-23-81* «Стальные конструкции».

$$A = 2b_f t_f + h_w t_w \quad (10)$$

$$\frac{N}{\Phi_{z(y)} A R_y} \leq 1 \quad (11)$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{ef}}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{uw,nc} \quad (12)$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{b_{ef}}{t_f} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{uf,nc} \quad (13)$$

$$\lambda_z = \frac{\mu_z \ell}{i_z} \leq [\lambda] \quad (14)$$

$$\lambda_y = \frac{\mu_y \ell}{i_y} \leq [\lambda] \quad (15)$$

Оптимизация сечений при изгибе (16)–(19).

$$A = 2b_f t_f + h_w t_w \quad (16)$$

$$\frac{\max M}{\Phi_b W_Z R_y} \leq 1 \quad (17)$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{ef}}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{iw,и} \quad (18)$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{b_{ef}}{t_f} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{if,и} \quad (19)$$

Оптимизация сечений при сжатии с изгибом (20)–(24).

Учитываются ограничения по устойчивости внецентренно-сжатого стержня в плоскости и из плоскости (21), (22), а также ограничения по местной устойчивости стенки и полки (23), (24).

$$A = 2b_f t_f + h_w t_w \quad (20)$$

$$\frac{N}{\Phi_e A R_y} \leq 1 \quad (21)$$

$$\frac{N}{c \Phi_y A R_y} \leq 1 \quad (22)$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{ef}}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{iw,сж-и} \quad (23)$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{b_{ef}}{t_f} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \leq \bar{\lambda}_{if,сж-и} \quad (24)$$

Для обоснования предложенного алгоритма, выбора его параметров и проверки достоверности полученных результатов решено большое количество тестовых примеров (табл. 2–4).

Таблица 2

**Исходные данные и результаты оптимального проектирования
тестовых примеров центрально-сжатых стержней**

№	Исходные данные				Результаты расчета				
	N , кН	ℓ_z , м	ℓ_y , м	R_y , МПа	b_f , см	t_f , см	h_w , см	t_w , см	A , см ²
1	2150	12,0	6,0	210	38,925	1,207	41,126	0,772	125,7
2	2300	7,0	2,0	240	25,8	1,054	45,470	1,13	105,08
3	2200	8,0	8,0	210	40,774	1,316	40,315	0,857	141,8
4	1000	9,0	9,0	225	35,323	0,886	20,593	0,617	75,3
5	4500	4,55	4,55	400	35,054	1,634	30,084	0,863	140,5
6	2000	12,0	4,0	355	27,186	0,870	41,729	0,808	81,5
7	2920	5,04	5,04	210	44,529	1,513	28,146	0,719	154,9
8	2000	12,0	4,0	220	31,648	1,016	48,315	0,932	109,4

Таблица 3

**Исходные данные и результаты оптимального проектирования
тестовых примеров изгибаемых стержней**

№	Исходные данные								Результаты расчета				
	ℓ , м	M , кН·м	Q , кН	R_y , МПа	R_s , МПа	E , МПа	$[\nu]$, см	$\bar{\kappa}_{w,и}$	b_f , см	t_f , см	h_w , см	t_w , см	A , см ²
1	14	2310	594	240	139	$2,06 \cdot 10^5$	4,2	4,1	39,89	1,56	118,22	0,99	241,5
2	12	2790	930	230	133	$2,07 \cdot 10^5$	3,6	5,5	35,71	1,73	146,46	0,88	252,5
3	18	846,5	156,8	335	195	$2,1 \cdot 10^5$	9,2	5,3	17,98	0,97	98,33	0,75	108,6
4	18	6249	1389	260	150	$2,1 \cdot 10^5$	5,4	4,9	54,32	1,96	170,88	1,23	423,1
5	12	1800	600	230	135	$2,1 \cdot 10^5$	5,8	3,5	38,37	1,39	109,25	1,03	219,2
6	24	165,6	27,6	215	125	$2,1 \cdot 10^5$	7,2	3,2	18,19	0,65	77,37	0,78	84,0
7	9	1387	616,5	230	135	$2,1 \cdot 10^5$	2,7	3,2	28,28	1,52	100,48	1,05	191,5

Таблица 4

**Исходные данные и результаты оптимального проектирования
тестовых примеров сжато-изгибаемых стержней**

№	Исходные данные					Результаты расчета				
	N , кН	M , кН·м	ℓ_z , м	ℓ_y , м	R_y , МПа	b_f , см	t_f , см	h_w , см	t_w , см	A , см ²
1	657	855	14,1	0,248	230	38,58	1,32	65,96	1,32	188,9
2	723	1357	18	0,333	210	44,23	1,48	84,97	1,97	266,0
3	201	106	11	0,337	215	19,65	0,65	34,34	0,83	54,0
4	1500	500	11	0,436	230	42,96	1,39	51,87	1,05	173,9
5	930	319	15,6	0,231	210	33,00	0,94	60,62	1,03	124,5

После нахождения оптимального решения размеры сечений округлялись в соответствии с требованиями сортамента листового проката. В диссертации на конкретных примерах показано, что корректировка сечения не требует существенного увеличения расхода материала.

Таким образом, предложенная схема оптимизации размеров сечений является единой для центрально-сжатых, сжато-изгибаемых и изгибаемых стержней. Коэффициенты снижения расчётного сопротивления и предельные гибкости (φ , φ_b , φ_e , φ_y , c , $\bar{\lambda}_{uf}$, $\bar{\lambda}_{uv}$), легко перепрограммируются для других типов поперечных сечений, а также при изменении методик, заложенных в нормы проектирования.

Алгоритм оптимизации размеров сечений отдельных стержней использован при оптимальном проектировании плоских стальных рам. После определения внутренних усилий и расчета на устойчивость для каждого КЭ устанавливается вид напряженно-деформированного состояния. Коэффициенты приведения длины в плоскости вычисляются из расчёта на устойчивость, коэффициенты приведения длины из плоскости μ_y задаются. Полный перечень ограничений приведен в табл. 5.

Таблица 5

Перечень ограничений задачи оптимального проектирования плоских стальных рам с учетом требований СНиП II-23-81*

№	Вид ограничения	№	Вид ограничения
1...9	Прочность	22	Предельная гибкость для растянутого элемента
10...15	На минимальные и максимальные размеры листов, составляющих сечение	23	Местная устойчивость полки сжатого элемента
16	Устойчивость центрально сжатого элемента в плоскости	24	Местная устойчивость стенки сжатого элемента
17	Устойчивость центрально сжатого элемента из плоскости	25	Местная устойчивость полки изгибаемого элемента
18	Устойчивость изгибаемого элемента	26	Местная устойчивость стенки изгибаемого элемента
19	Устойчивость внецентренно-сжатого элемента в плоскости	27	Местная устойчивость полки сжато-изгибаемого элемента
20	Устойчивость внецентренно-сжатого элемента из плоскости	28	Местная устойчивость стенки сжато-изгибаемого элемента
21	Предельная гибкость для сжатого элемента		

Для иллюстрации работы предложенного алгоритма приведем пример оптимального проектирования стальной рамы спортивного комплекса в г. Чик Новосибирской области (рис. 4). Результаты расчёта приведены в табл. 6. Оптимальные сечения элементов определялись для случая, когда все стержни имеют одинаковое поперечное сечение

(строка 1 табл. 6), варьируются жесткости колонны и ригеля (строка 2), варьируются жесткости колонн, ригелей покрытия и перекрытия (строка 3). В четвертой строке приведены результаты решения задачи оптимального проектирования для соотношения жесткостей, соответствующих принятому проектному решению (колонны – двутавр № 20К1, ригели – двутавр 35Б1 по ГОСТ 26020-83, расход материала 228209 см^3). Таким образом, экономия материала при варьировании двумя типами жесткости по сравнению с проектом составила 10,1 %.

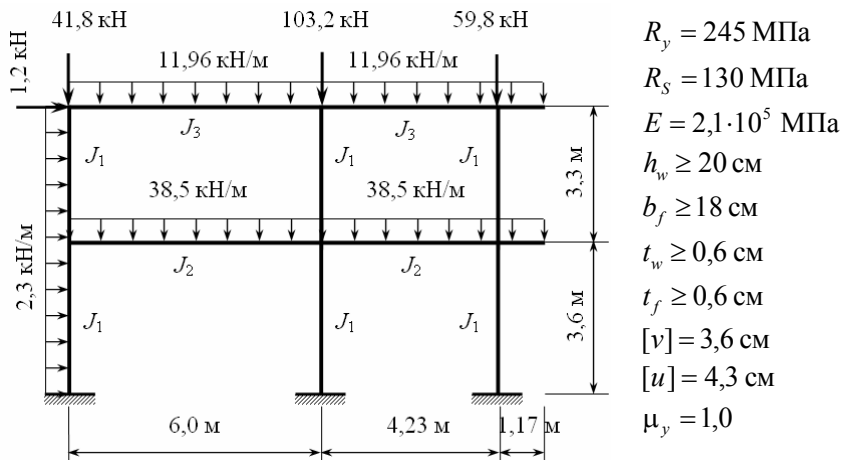


Рис. 4. Исходные данные для оптимального проектирования стальной рамы

Таблица 6

Результаты оптимального проектирования плоской стальной рамы (рис.4)

№	Соотношения жесткостей			Тип жесткости	Размеры сечений элементов, см				Площадь сечения A , см^2	Объем $V(\gamma^*)$, см^3
	γ_1^*	γ_2^*	γ_3^*		b_f	t_f	h_w	t_w		
1	1,0	1,0	1,0	1	21,053	0,761	24,183	1,409	66,11	287565
2	1,0	4,0	4,0	1	17,983	0,611	20,011	0,603	34,05	207282
				2	19,794	0,691	34,268	0,776	53,97	
3	1,0	5,5	1,0	1	18,024	0,613	20,063	0,605	34,235	169937
				2	19,549	0,650	41,498	0,662	52,908	
				3	17,983	0,604	20,208	0,608	33,99	
4	1,0	2,775	2,775	1	17,983	0,600	19,982	1,507	51,688	228573
				2	18,345	0,706	31,799	0,850	52,944	

В четвертой главе исследованы вопросы выбора опасных сочетаний нагрузок при формировании ограничений по прочности, жесткости, общей устойчивости для плоской стержневой системы, находящейся под действием многопараметрической нагрузки. Количество возможных сочетаний нагрузок представляет собой счетное множество.

Задачу оптимального проектирования сформулируем следующим образом: при любых возможных сочетаниях нагрузок требуется определить вектор размеров поперечных сечений, доставляющий минимум расходу материала при удовлетворении условиям прочности, жесткости, местной и общей устойчивости и конструктивным требованиям.

Усилия и перемещения зависят от приложенных нагрузок линейно и для обеспечения условий прочности и жесткости достаточно осуществлять соответствующие проверки при всех возможных сочетаниях, в которые та или иная нагрузка входит со своим экстремальным значением. В работе показано, что при определении опасных из условия устойчивости сочетаний нагрузок достаточно ограничиться только вершинами многогранника области нагрузок. При большом количестве независимых нагрузок число вершин многогранника будет велико, что может привести к существенному увеличению расчетов. Для их уменьшения в диссертационной работе предложены два алгоритма.

Алгоритм исключения нагрузок. На первом этапе рассчитывается система при одновременном загрузении всеми нагрузками. Затем одна из временных нагрузок исключается. Из рассмотренных вариантов оставляют тот, при котором критическая нагрузка на сооружение наименьшая. На втором и последующем этапах исключается очередная временная нагрузка. Если после очередного этапа критическая нагрузка не уменьшается, то переходят к варианту со второй по величине критической нагрузкой. Вычисления прекращают, если исключены все временные нагрузки или все варианты, приводящие к уменьшению критической нагрузки, рассмотрены.

В алгоритме добавления нагрузок на каждом этапе к постоянной нагрузке добавляют по одной временной.

Вычислительные эксперименты, выполненные в работе, позволили сделать следующие выводы:

– решения по двум предложенным в диссертационной работе алгоритмам и решения, полученные путём перебора всех возможных сочетаний нагрузок, совпадают;

– алгоритм исключения нагрузок приводит к решению задачи быстрее, чем алгоритм добавления нагрузок.

В качестве иллюстрации рассмотрим пример расчёта рамы при действии на неё одной постоянной и трех временных нагрузок (рис. 5, а). Дерево возможных сочетаний нагрузок показано на рис. 5, б. Таблицы перебора всех возможных вариантов действия и определения опасного сочетания нагрузок по двум предложенным алгоритмам приведены на рис. 5, в–д. Наиболее невыгодное загружение по устойчивости выделено в таблицах серым цветом.

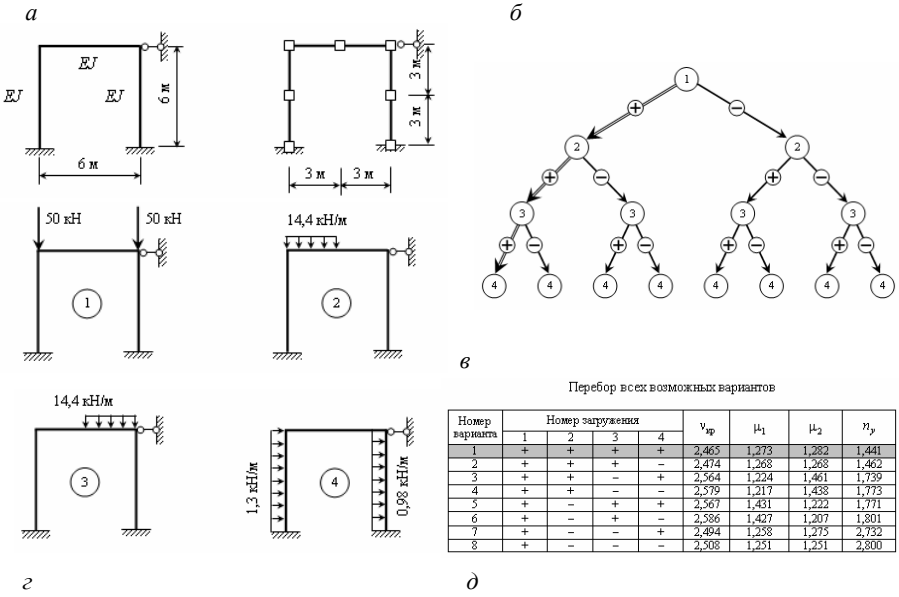


Рис. 5. Исходные данные для расчета рамы, нагруженной постоянной и временными нагрузками (а); дерево возможных сочетаний нагрузок (б); перебор всех возможных вариантов (в); алгоритм исключения нагрузок (г); алгоритм добавления нагрузок (д)

Предложенный алгоритм оптимального проектирования при однопараметрическом нагружении, с некоторыми изменениями может быть использован при действии многопараметрической нагрузки.

Эти изменения заключаются в следующем: расчет производится на каждое загрузке в отдельности. Затем для каждого типа жесткости определяется наиболее невыгодное сочетание нагрузок по прочности, по жесткости и устойчивости. Если количество сочетаний нагрузок невелико, то для упрощения программирования возможно эти сочетания формировать вручную.

Приведем пример оптимального проектирования плоской стержневой системы (рис. 6). Все возможные сочетания нагрузок представлены в табл. 7, результаты расчетов приведены в табл. 8.

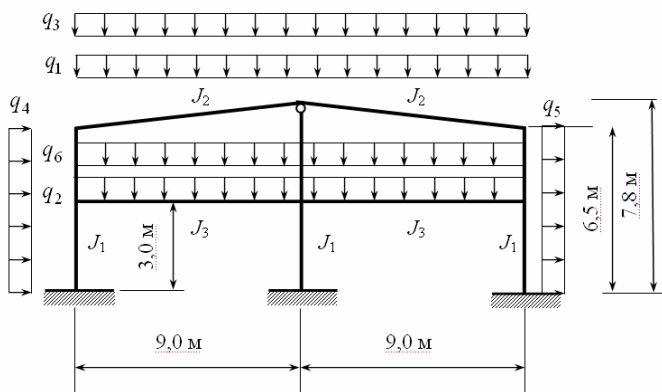


Рис. 6. Исходные данные для оптимального проектирования плоской стержневой системы при действии многопараметрической нагрузки

Таблица 7

Варианты возможных сочетаний нагрузок

Номер возможного сочетания нагрузок	Нагрузка, кН/м					
	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
1	3,18	14,88	–	–	–	–
2	3,18	14,88	14,4	–	–	–
3	3,18	14,88	–	1,66	1,24	–
4	3,18	14,88	–	–	–	14,4
5	3,18	14,88	12,96	1,49	1,12	–
6	3,18	14,88	12,96	–	–	12,96
7	3,18	14,88	–	1,49	1,12	12,96
8	3,18	14,88	12,96	1,49	1,12	12,96

Таблица 8

Результаты оптимального проектирования рамы (рис. 6)

№	Соотношения жесткостей			Объем $V(\gamma^*)$, см ³	Экономия материала, %
	γ_1^*	γ_2^*	γ_3^*		
1	1,0	1,0	1,0	425172	–
2	1,0	10,25	10,25	324199	23,7
3	1,0	4,0	8,5	290815	31,6

В пятой главе приводятся сведения о порядке подготовки исходных данных для расчета и оптимального проектирования плоской стержневой системы.

Все предложенные в работе алгоритмы включены в программный комплекс по оптимальному проектированию плоских стержневых систем при одно- и многопараметрическом нагружении, разработанный на кафедре «Строительная механика» ТГАСУ. Результаты работы программ – внутренние усилия, перемещения, критические силы, формы потери устойчивости, коэффициенты приведения длины, оптимальные параметры сечений, значения ограничений и целевой функции.

Верификация программы в части вычисления внутренних усилий и перемещений проводилась сравнением с результатами расчетов в программных комплексах SCAD , ПРИНС и MicroFe. Составленная программа может быть использована для экспертизы проектных решений по СНиП II-23-81* «Стальные конструкции».

На основе разработанных в диссертационной работе алгоритмов проведены исследования влияния варьируемых параметров на величину расхода материала. Оптимальные размеры сечений стержней находились при одновременном варьировании всеми параметрами, несколькими параметрами, одним параметром. Для заданного соотношения между всеми параметрами сечений определялся коэффициент пропорционального их изменения, доставляющий минимум целевой функции. Выполнен анализ результатов, полученных в ходе вычислительных экспериментов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложено и обосновано разделение задачи оптимального проектирования плоских стержневых систем при многопараметрическом нагружении с учетом ограничений прочности, жесткости, общей и местной устойчивости и конструктивных требований на два уровня: на нижнем уровне отыскиваются оптимальные размеры поперечных сечений элементов при заданном соотношении жесткостей; на верхнем уровне определяется оптимальное соотношение жесткостей, с использованием на каждом уровне одного критерия качества.

2. Предложенный подход не требует аппроксимации усилий, перемещений, критических сил, коэффициентов приведения длин сжатых стержней в функции от размеров поперечных сечений. Опасные сочетания нагрузок в ходе оптимизации системы с заданным соотношением жесткостей не изменяются. Данная схема позволяет использовать в оптимальном проектировании возможности программных комплексов SCAD, Lira, Stark ES и др.

3. Установлено, что функция цели вблизи точки оптимума является пологой, что позволяет останавливать процесс при достаточно малых изменениях объема материала конструкции. Полученные оптимальные решения приводят к существенной экономии материала (7–9 %), оставаясь при этом легко осуществимыми на практике.

4. Предложен единый алгоритм оптимизации центрально-сжатых, изгибаемых, сжато-изгибаемых стержней с поперечным сечением в виде составного двутавра с двумя осями симметрии с учетом требований СНиП-II-23-81* «Стальные конструкции». Разработанный алгоритм может быть использован для других типов поперечных сечений и норм проектирования, а также для проверки других методик определения оптимальных размеров поперечных сечений.

5. Для выбора опасного сочетания нагрузок по общей устойчивости предложено два алгоритма: алгоритм добавления нагрузок и алгоритм исключения нагрузок. Как правило, алгоритм исключения нагрузок оказывается более эффективным, чем алгоритм добавления нагрузок. Показано, что полученное по обоим алгоритмам решение совпадает с результатом перебора всех возможных сочетаний нагрузок при существенно меньших вычислениях.

6. Предложенные в работе алгоритмы включены в программный комплекс по оптимальному проектированию плоских стержневых си-

стем при одно- и многопараметрическом нагружении, разработанный на кафедре «Строительная механика» ТГАСУ. Ряд программ может быть использован для экспертизы проектных решений.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. Путеева, Л.Е. Двухуровневый алгоритм оптимизации плоских стержневых систем при ограничениях по прочности, жесткости и устойчивости / Б.А. Тухфатуллин, Л.Е. Путеева // Вестник ТГАСУ. – 2007. – №2. – С.143–149.

2. Путеева, Л.Е. Оптимизация плоских стальных рам с учетом требований норм проектирования / Б.А. Тухфатуллин, Л.Е. Путеева // Вестник ТГАСУ.–. 2008. – № 3. – С.171–175.

Публикации в других изданиях

3. Путеева, Л.Е. Оптимальное проектирование стержневых систем под действием многопараметрической нагрузки при учете ограничений по прочности, жесткости, устойчивости и на частоту собственных колебаний / Л.Е. Путеева, Б.А. Тухфатуллин // «Архитектура и строительство»: Тезисы докладов научно-техн. конференции. – Томск: ТГАСУ, 1999. – С. 65–66.

4. Путеева, Л.Е. Оптимальное проектирование тонкостенных стержней при ограничениях по прочности, жесткости и устойчивости / Л.Е. Путеева, Б.А. Тухфатуллин, // Труды НГАСУ, т. 3, № 1 (8). – Новосибирск: НГАСУ. – т. 3, №1 (8), 2000. – С.26–30.

5. Путеева, Л.Е. Определение оптимальных размеров коробчатого поперечного сечения при действии на конструкцию многопараметрической нагрузки / Б.А. Тухфатуллин, Л.Е. Путеева // «Проблемы оптимального проектирования сооружений»: Сб. докладов III Всеросс. семинара. – Новосибирск: НГАСУ, 2000. – Т. 2. – С. 124–128.

6. Путеева, Л.Е. Алгоритм оптимизации стержневых систем по группам переменных при ограничениях по прочности, жесткости и устойчивости / Б.А. Тухфатуллин, Л.Е. Путеева // «Проблемы оптимального проектирования сооружений»: доклады I Всеросс. конф. – Новосибирск: НГАСУ, 2008.–С. 390–396.

7. Путеева, Л.Е. Поиск оптимального распределения материала при проектировании плоских стальных рам / Б.А. Тухфатуллин, Л.Е. Путеева // Тр. межд. конф. «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения». – Санкт-Петербург, 2008. – Т. 2. – С. 363–364.

8. Путеева, Л.Е. Определение невыгодного сочетания нагрузок из условия устойчивости / Л.Е. Путеева, Б.А. Тухфатуллин // «Строительство-2011»: материалы межд. науч.-практ. конф.– Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2011. – С. 163–165.

9. Путеева, Л.Е. Определение оптимальных размеров центрально-сжатых стержней двутаврового сечения / Л.Е. Путеева, Б.А. Тухфатуллин // «Строительная индустрия: вчера, сегодня, завтра» II межд. науч.-практ. конф. МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГМХА, 2011. – С. 142–146.

Подписано в печать __ . __ .13. Формат 60x84.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч.– изд. л. 1,26
Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГАСУ», 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ФГБОУ ВПО «ТГАСУ».
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.