

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

На правах рукописи

БУ-САЛЕХ НАДЖИ ФУАД

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ  
ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Специальность 05.23.01 - Строительные конструкции,  
здания и сооружения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Киев-1996

20  
116.36.388  
Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре ЛННБ України ім.В.Стефаніка  
рукий Киевского государственного университета строительства и архитектуры /КГУСА/



00743828 (W)

Научный руководитель

- доктор технических наук, профессор  
ПЕРМЯКОВ Владимир Александрович

Официальные оппоненты

- доктор технических наук, профессор  
КОЛЯКОВ Марк Йосифович

- кандидат технических наук, доцент  
МАНЬКО Анатолий Васильевич

Ведущая организация

- ОАО "УкрНИИпроектстальконструкция",  
г. Киев

Защита состоится 27. Декабря 1996 г. в 13 часов на заседании специализированного ученого совета Д 01.18.05 при Киевском государственном техническом университете строительства и архитектуры /252037, Киев-37, Воздухофлотский пр., 31/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГУСА.

Автореферат разослан 26. Ноябрь 1996 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета  
кандидат техн. наук, ст. науч. сотр.

КОБИЕВ В.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень исследования тематики диссертации. Проблема рационального использования материала в строительных конструкциях входит в число важнейших и ее решение ведется различными методами, что подчеркивает многовариантность конструктивных решений объекта проектирования и необходимость выполнения значительных по объему исследований, направленных на выбор наиболее эффективного из них. Значительную роль при этом играют методы оптимального проектирования, суть которых заключается в описании в той или иной математической форме поставленной задачи и ее решение при наличии заданных ограничений и принятых критериев оптимальности. В математических моделях задач оптимизации в качестве переменных проектирования, как правило, рассматриваются усилия в системе, возникающие от внешних воздействий, в том числе и усилия преднапряжения, если они предусмотрены в конструкции, параметры геометрической схемы и сечений отдельных ее элементов. Однако только в отдельных случаях вопросы распределения материала по поперечному сечению рассматриваются в единой задаче оптимизации конструктивной формы, ибо с целью упрощения оптимизационного расчета компоновке поперечных сечений элементов уделяется внимание после его завершения.

Вместе с тем, в конструкциях с составными элементами такой общепринятый подход приводит к несколько искаженному результату. Так, по заданной площади /даже оптимальной по принятому критерию/ можно скомпоновать ряд стений с различными геометрическими характеристиками, что особенно для статически неопределимых систем повлияет на распределение внутренних усилий. Кроме того геометрические характеристики сечений влияют на значения коэффициентов, принимаемых при расчете на устойчивость сжатых стержней. Это замечание отражается на результатах проектирования как статически неопределимых, так и статически определимых систем, особенно в случае поиска их оптимальных геометрических схем.

Наиболее точные методы оптимизации составных сечений строятся на последовательном приближении к оптимальному результату, что усложняет их использование в процессе оптимизации конструкции в целом, для которого используются, как правило, итерационные методы математического программирования. В этой связи возни-

ЛИБР ім. В. Стефаника  
АН України

кает необходимость в разработке безитерационных алгоритмов подбора и компоновки сечений отдельных элементов стержневых конструкций, приспособленных для возможности их использования при решении задач оптимального проектирования.

**Цель и основные задачи научного исследования.** Цель диссертационной работы состоит в разработке методик прямого подбора составных сплошностенчатых поперечных сечений центрально- и внецентренно-сжатых стержней, используемых при оптимальном проектировании стержневых конструкций. Достижение поставленной цели осуществляется на основе решения следующих задач: разработка алгоритмов прямого подбора и компоновки поперечных сечений центрально- и внецентренно-сжатых стержней в соответствии с требованиями СНиП и европейских норм "Еврокод-3"; выявление закономерностей изменения параметров оптимальных поперечных сечений; сопоставление результатов проектирования по СНиП и "Еврокод-3"; совершенствование метода оптимального проектирования стальных стержневых конструкций за счет учета оптимальной компоновки поперечных сечений сжатых стержней.

**Методы исследования.** Для решения задач компоновки поперечных сечений используются аналитические методы, а при оптимальном проектировании стержневых конструкций – методы конечных элементов /для статического расчета/ и неортогонального проектирования градиентов целевой функции с компенсацией невязки на границе области допустимых решений /для решения задачи оптимизации/.

**Личный вклад диссертанта в разработку научных результатов** состоит в следующем:

- разработаны безитерационные алгоритмы компоновки оптимальных двутавровых, коробчатых и крестообразных сечений центрально-сжатых, а также двутавровых сечений внецентренно-сжатых элементов;

- выявлены закономерности распределения материала по поперечному сечению оптимально спроектированных сжатых стержней в зависимости от исходных данных;

- сопоставлены и проанализированы результаты проектирования по СНиП и "Еврокод-3";

- разработана подпрограмма компоновки поперечных сечений сжатых стержней в пакет прикладных программ "ПОИСК", предназначенный для решения обобщенной задачи оптимального проектирования стальных стержневых конструкций;

- доказана необходимость и экономическая эффективность учета особенностей компоновки составных сечений сжатых элементов при оптимальном проектировании конструкций.

**Обоснование теоретической и практической ценности исследований и их научной новизны.** Научная новизна и теоретическая ценность результатов работы состоит в следующем:

- обоснована необходимость и целесообразность учета вопросов компоновки составных поперечных сечений элементов при оптимальном проектировании конструкций;

- разработаны безитерационные алгоритмы подбора поперечных сечений, приспособленных для решения задач оптимального проектирования конструкций.

Достоверность результатов обеспечена корректностью математической постановки задачи, применением апробированных методов при решении задачи оптимизации, что обеспечивает количественную и качественную сходимость результатов исследований с данными, полученными другими авторами.

Практическое значение диссертационной работы определяется разработкой прикладных программ для ЭЭМ, позволяющих с целью снижения материалоемкости решать задачи оптимизации как на локальном /проектирование стержней по заданным усилиям/, так и на глобальном /проектирование стержневых конструкций/ уровнях.

**Уровень реализации, внедрения научных разработок.** Методика компоновки поперечных сечений сжатых стержней и пакет прикладных программ для оптимального проектирования стальных стержневых конструкций могут быть внедрены в проектных организациях, а также используются в учебном процессе в КТУСА.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты выполненных исследований докладывались на У Украинской научно-технической конференции по металлическим конструкциям /г.Киев, 1992 г./, на 52, 54 и 55 научно-практических конференциях КТУСА /г.Киев, 1992-1995 г.г./.

**П у б л и к а ц и и.** По теме диссертации опубликовано 3 работы, в которых изложены основное содержание диссертации.

**Ст р у к т у р а и о б ъ е м р а б о т ы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка используемой литературы. Общий объем работы составляет 143 страницы машинописного текста, в том числе 105 страниц основного текста, 21 рисунок и 13 таблиц на 19 страницах и библиография из 172 наименований на 19 страницах.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и отмечается роль оптимального проектирования конструкций в решении проблемы повышения их эффективности. Подчеркивается научный и практический интерес к сопоставлению результатов проектирования по отечественным и европейским нормам, что особенно важно для успешного экспорта стальных строительных конструкций в европейские страны, а также при выборе концепции разработки национальных норм проектирования.

В первой главе приведен анализ методов оптимизации поперечных сечений элем.нтов и стержневых конструкций, а также изложены особенности проектирования стальных конструкций по европейским нормам. Отмечено, что методы компоновки составных сечений различной формы и назначения должны базироваться на тех же принципах, которые приняты при разработке сортаментных профилей. К ним относятся требования обеспечения минимального расхода стали, местной устойчивости элементов сечения и технологичности принятой формы профиля.

Суть методов компоновки составных сечений сводится к установлению зависимости между действующими в стержне усилиями и параметрами сечения, отвечающих условиям прочности, жесткости, общей и местной устойчивости. Эти зависимости устанавливаются аналитически, если это возможно или численно путем реализации алгоритмов прямого проектирования. Отмечается вклад М.В.Бакиева, В.Б.Барского, М.И.Беккермана, Г.Е.Бельского, Б.И.Беляева, М.М.Бердичевского, Ю.С.Борисенко, Ф.В.Василькова, В.М.Вахуркина, Е.Ю.Давидова, Н.Н.Демидова, А.О.Звирсыяна, Я.Л.Кеплуна, В.П.Кочетова, Ю.И.Кудышина, А.В.Манько, К.К.Муханова, В.Д.Насонкина, Ю.В.Соболева и др. в разработку и развитие методов оптимизации попереч-

ных сечений изгибаемых и скатых стержней.

Анализ реферируемых работ позволил обобщить рекомендации по компоновке оптимальных двутавровых сечений, которые являются объектом исследований в абсолютном большинстве работ. Так, минимальный расход стали вне зависимости от напряженного состояния элемента достигается при компоновке сечения из листов, для которых условия местной устойчивости выполняются на пределе. В колоннах целесообразно стремиться не только к максимальной тонкостенности стенок и полок, но и к равноустойчивости относительно главных осей стержня, хотя такие сечения не всегда оказываются рациональными с технологической точки зрения, так как при определенных соотношениях расчетных длин стержня свесы полок оказываются такими большими, что затрудняют изготовление таких элементов с помощью автоматической сварки.

Следует отметить, что задачи посвященные компоновке поперечных сечений стержней, имеют самостоятельное значение и результаты их решения практически не используются при оптимизации конструкции в целом. А между тем размеры поперечных сечений наряду с усилиями /напряжениями/ в системе, включая усилия преднапряжения, и геометрические параметры исследуемой формы рассматриваются в качестве переменных, варьирование которыми наиболее существенно влияет на конечный результат проектирования.

Формулировка задач оптимального проектирования стержневых конструкций в форме задач математического программирования, характерная для большинства работ, опубликованных в последние годы, явилась логическим завершением этапа становления теории оптимальных систем, основы которой заложены в трудах И.М.Рабиновича, Ю.А.Радцига, А.И.Виноградова и др. Постановка и математическая формулировка задач оптимального проектирования отличается разнообразием, что обусловлено прежде всего рассматриваемыми критериями оптимальности, переменными проектирования, полнотой учитываемых требований, а также принятыми предпосылками расчета и методами его реализации. Отмечаются работы М.В.Банличука, В.А.Бараненко, В.В.Бирюлева, А.В.Геммерлинга, Е.Н.Герасимова, В.Н.Гордеева, Е.В.Горохова, Г.И.Гребенюка, В.Л.Каганова, М.И.Колякова, В.П.Малкова, Я.И.Селькова, В.А.Пермякова, Ю.М.Почмана, В.В.Трофимовича, И.С.Холопова, В.Н.Шимановского и многих других в области развития методов оптимизации стальных конструкций с учетом специфики их конструирования, изготовления и монтажа, блв-

годаря чему обеспечивается возможность практического использования результатов оптимального проектирования.

Анализируя предлагаемые методы оптимального проектирования, можно сделать вывод о недостаточности внимания исследователей, уделяемом вопросу компоновки составных поперечных сечений стержней. Справедливости ради необходимо отметить, что в большинстве работ рассматривались конструкции, элементы которых проектировались из прокатных профилей. Однако для тяжело нагруженных систем, где использование составных элементов неизбежно, учет компоновки их сплошностенчатых сечений оказывает влияние на конечный результат проектирования и его необходимо вести на всех этапах оптимизационного расчета, корректируя на каждом из них распределение усилий и материала в стержневой конструкции. Кроме того многие авторы рассматривают наиболее употребляемую форму сечения — двутавровое. В то же время, в частности, для центрально-сжатых стержней, применяются и другие типы сплошностенчатых сечений, прежде всего коробчатые и крестообразные. Для таких элементов исследования практически не проводились.

При рассмотрении особенностей проектирования стальных конструкций по европейским нормам особое внимание обращено на требования, предъявляемые для центрально- и внецентренно-сжатых стержней с точки зрения обеспечения их общей и местной устойчивости. Проведены сопоставления значений коэффициентов, учитываемых при расчете элементов на устойчивость и показаны расхождения с аналогичными значениями, приведенными в отечественных нормах.

Во второй главе сформулирована задача компоновки поперечных сечений сжатых стержней и приведены разработанные алгоритмы, построенные на реализации признаков оптимальности: максимальной тонкостенности элементов сечения, равноустойчивости стержня относительно главных осей и технологичности изготовления. Задача сводится к поиску оптимальной гибкости стержня, в качестве которой принята гибкость элемента, сечение которого удовлетворяет указанным требованиям.

Оба условия оптимальности сечения удается реализовать аналитически только при проектировании центрально-сжатого стержня. При внецентренном сжатии задача компоновки составного сечения становится многовариантной и получить аналитическое решение по условию равноустойчивости стержня достаточно сложно. Поэтому

избран путь, связанный с установлением коэффициента распределения материала между полками и стенкой равноустойчивого двутаврового сечения, определяемого по результатам пробного проектирования. Такой подход существенно упрощает решение, хотя и приводит к некоторому /в пределах 2-3%/ нарушению условия равноустойчивости стержня, чем однако, вследствие неизбежного перехода от теоретических к сортаментным размерам листовых элементов сечения на завершающем этапе расчета, можно пренебречь.

Еще одно требование, технологическое, связанное с возможностью механизации сварочных работ при изготовлении составных сплошностенчатых стержней, должно быть выполнено при компоновке двутавровых сечений - ширина полок не должна превышать высоты стенки. Соблюдение этого условия при реализации первых двух требований возможно при соотношении расчетных длин стержня, превышающем  $S > 1,82$  /при  $S = 1,82$  ширина полки равна высоте стенки двутавра/. Таким образом при  $S \geq 1,82$  могут быть реализованы условия равноустойчивости, и технологичности, а при  $S < 1,82$  первое условие выполнять не следует, отдавая предпочтение удобству изготовления элементов.

Предлагаемая методика компоновки составных сечений скатых элементов сохраняет принципы постановок аналогичных задач, однако отличается рядом особенностей, связанными с допущением непрерывности изменения искомым параметров сечения, выполнением нормативных требований без упрощений, используемых многими авторами для получения решения, отсутствием необходимости многократного повторения расчета для достижения оптимального результата. Эти особенности существенно облегчают использование разработанной методики как самостоятельного вычислительного аппарата при подборе сечений элементов по заданным расчетным условиям, так и при решении более сложных задач оптимального проектирования стержневых конструкций с поиском их геометрических и /или/ физических параметров.

Для определения оптимальной условной гибкости центрально-сжатого стержня  $\bar{\lambda}$  использовано условие его общей устойчивости. Значение коэффициента продольного изгиба, а также предельных гибкостей стенки и полок представлено в функции от  $\bar{\lambda}$  с использованием коэффициента

$$\alpha = \frac{Af}{A} = 1 / \left( 3\sqrt{1 + 2\lambda_{uf} S^2 / 9\lambda_{uw}} - 1 \right), \quad /1/$$

найденного из условия равноустойчивости стержня и параметра исходных данных

$$\delta = R_y^2 \delta_c \lambda_{ef,y}^2 \sqrt{R_y/E} / EN \quad /2/$$

Здесь и далее обозначения приняты в соответствии со СНиП II-23-81<sup>ж</sup>.

Уравнения для определения оптимальной условной гибкости стержня имеют вид /для двутаврового сечения/:

$$\text{при } \bar{\lambda} \leq 3,14$$

$$\bar{\lambda}^3 + (3,6 + 1,05 \delta K / \alpha^2) \bar{\lambda}^2 - 28,5 \delta K / \alpha^2 = 0 \quad /3/$$

$$\text{при } \bar{\lambda} > 4,0$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{28,42 \delta / \alpha^2}, \quad /4/$$

где  $K = 1,33 \sqrt{R_y/E} + 0,96I$  - поправочный коэффициент, корректирующий значение коэффициента продольного изгиба  $\varphi$  при различных сталях.

Коэффициент  $\alpha$ , учитывающий распределение материала по сечению, определяется исходя из подсчитанных по СНиП II-23-81<sup>ж</sup> средних соотношений предельных гибкостей полки и стенки: при  $\bar{\lambda} \leq 3,14$ ,  $2\lambda_{uf}/9\lambda_{uw} = 0,132$ , а при  $\bar{\lambda} > 4,0$  это значение равно 0,147.

При  $3,14 < \bar{\lambda} \leq 4,0$  указанное соотношение нестабильно, поэтому для определения  $\bar{\lambda}$  использовано корреляционное уравнение, полученное методом наименьших квадратов из анализа результатов решения уравнения /3/ во всем диапазоне изменения  $S$ ,  $\delta$  и  $\alpha$ :

$$2,88 \bar{\lambda}^2 / (S^2 - 0,202 S + 3,08) - 15,9 \bar{\lambda} / (S^2 + 0,03 S + 2,84) +$$

/5/

$$+ 25,4 / (S^2 - 0,265 S + 2,76) - J' = 0$$

Выбор уравнения для поиска  $\bar{\lambda}$  осуществляется по параметру  $J'$ , для которого установлены соответствующие граничные значения, определяющие диапазон изменения  $\bar{\lambda}$ . По оптимальному значению  $\bar{\lambda}$  выполняется компоновка сечения.

Помимо двутавровых, рассмотрены коробчатые и крестообразные профили, для которых определены аналогичные уравнения для определения оптимальной гибкости стержня.

Оптимальное составное двутавровое сечение внецентренно-сжатого стержня характеризуется, как и при центральном сжатии реализацией условия максимальной тонкостенности стенки и полки, а также равенством нормальных напряжений, найденных в плоскости и из плоскости действия момента, что выражается в виде условия равноустойчивости

$$\varphi_x = C \cdot \varphi_y$$

/6/

Учитывая разрывность функций, входящих в /6/ направлением перебором вариантов сконструировано более 500 поперечных сечений, размеры которых удовлетворяют требованиям норм проектирования по обеспечению устойчивости стержня с соблюдением равенства /6/, местной устойчивости стенки и полок при их максимальной тонкостенности, а также удовлетворения требований технологичности. Широкий диапазон варьирования исходными данными позволил использовать полученные результаты для определения методом пошаговой регрессии коэффициента удельной площади стенки  $\theta$  и предельной гибкости стенки  $\lambda_{lim}$  в зависимости от заданных значений продольного усилия  $N$ , расчетного сопротивления стали  $R_y$ , расчетных длин стержня  $l_{ef,x}$  и  $l_{ef,y}$ , эксцентриситета  $e = M / N$ , а также относительного эксцентриситета, для определения которого получена эмпирическая формула

$$m = \frac{M}{N} \frac{A}{W_x} = 951 \sqrt[4]{e^3 (R_y/E)^2 / \sqrt[3]{N}} \quad /7/$$

Основываясь на возможности перехода при подборе оптимальных сечений от внецентренно-сжатого стержня к центрально-сжатому, эквивалентному по потере устойчивости, предлагаемый алгоритм построен по аналогии с изложенным выше с загрузением центрально-сжатого стержня условной продольной силой  $Ne$ , значение которой определяется известной формулой Ясинского

$$Ne = N(1 + \varphi \cdot m) \quad /8/$$

В этом случае уравнение для определения оптимальной условной гибкости внецентренно-сжатого стержня приобретает вид:

$$\text{при } \bar{\lambda} \leq 4,0$$

$$\bar{\lambda}^4 - \bar{\lambda}^2 \left( \frac{1}{\alpha m} + \frac{28,57}{k m} + 27,14 \right) + \frac{27,14}{\alpha m} = 0 \quad /9/$$

$$\text{при } \bar{\lambda} > 4,0$$

$$\bar{\lambda}^4 + \bar{\lambda}^2 \cdot 7,2 \cdot m - \frac{7,2}{\alpha} = 0, \quad /10/$$

где параметр исходных данных равен

$$\alpha = N \cdot E \cdot \lambda_{uw} \theta \left(1 - \frac{2}{3} \theta\right) / 4 \cdot R_y^2 \cdot \delta \cdot l_{ef}^2 \quad /11/$$

Для параметра  $\alpha$  установлены соответствующие граничные значения, исходя из которых выполняется выбор уравнения для определения  $\bar{\lambda}$ .

Задача подбора составных сечений сжатых стержней по европейским нормам решена аналогично с соблюдением соответствующих ус-

ловий проектирования. Учитывая, что для определения коэффициента продольного изгиба в "Еврокод-3" предложена единая формула для всего диапазона варьирования  $\bar{\lambda}$ , для каждого напряженного состояния получено по одному уравнению для поиска оптимального значения условной гибкости стержня.

Для всех разработанных алгоритмов компоновки сечений обращение к сортаментам листовой стали предусмотрено на завершающем этапе расчета.

В третьей главе представлен анализ результатов проектирования оптимальных поперечных сечений по предлагаемым алгоритмам в сравнении с данными, найденными альтернативными методами. Сопоставление полученных результатов с опубликованными в технической литературе свидетельствует с достоверности выполненных работ и в то же время демонстрирует определенные преимущества предлагаемых алгоритмов: отсутствие итерационного процесса поиска оптимальной условной гибкости стержня; строгая реализация принятых условий оптимальности; распространение разработанной методики на коробчатые и крестообразные формы сечений. Наиболее существенно использование предлагаемого подхода проявляется при внецентренном сжатии, ибо полученный результат незначительно отличается от достигаемого при направленном переборе вариантов решения, а по сравнению с методом, рекомендованным в "Пособия по проектированию стальных конструкций /с СНиП II-23-81<sup>к</sup>/", обеспечивает экономию материала в отдельных случаях до 30-40%.

При сравнении с результатами проектирования по европейским нормам выявлено заметное преимущество отечественных норм, позволяющих компоновать более легкие /до 10-40%/ сечения. Это объясняется не только имеющимися различиями в значениях коэффициентов, используемых при расчете на устойчивость, но и различием требований по обеспечению местной устойчивости элементов сечения, что сказывается и на их толщине.

По результатам опытного проектирования поперечных сечений выявлены закономерности изменения параметров сечений от оптимальных условных гибкостей стержней, которые снижаются с ростом продольных усилий и эксцентриситетов, с уменьшением расчетных длин и с увеличением их соотношения при постоянном продольном усилии.

Анализируя влияние расчетного сопротивления, выявлено, что

при внецентренном сжатии с ростом  $R_y$  площадь сечения убывает монотонно, а при центральном сжатии изменение расчетных сопротивлений при заданных параметрах стержня и действующего продольного усилия приводит к наименьшей площади стержня, что соответствует оптимальному значению условной гибкости, равному 4,0. Исходя из этого получены выражения для нахождения рационального расчетного сопротивления стали для стержней с различными формами сечений.

В четвертой главе изложены основные положения решения обобщенной задачи оптимального проектирования стальных стержневых конструкций с учетом компоновки составных сечений сжатых стержней, а также анализ результатов оптимального проектирования конкретных конструкций. Решение обобщенной задачи, сформулированной В.А.Пермяковым, направлено на поиск геометрических параметров заданной конструктивной формы, внутренних усилий в системе и размеров поперечных сечений отдельных элементов. Алгоритм решения построен с учетом выполнения статического расчета методом конечных элементов и поиска оптимального результата методом неортогонального проектирования градиента целевой функции с компенсацией невязки на границе допустимой области. В математическую модель задачи помимо целевой функции, описывающей принятый критерий оптимальности, включены ограничения, выражающие требования норм проектирования по обеспечению прочности, устойчивости, предельной гибкости отдельных элементов и жесткости стержневой конструкции. В качестве переменных рассматриваются координаты узлов системы, усилия предварительного напряжения в системе, если они предусмотрены проектом, и площади поперечных сечений стержней.

Для формирования ограничений используются геометрические характеристики сечений, вычисление которых на первом этапе выполняется по заданным начальным значениям  $f_i$ , а на последующих - по их текущим значениям. Для растянутых элементов, форма сечения которых не оказывает влияния на конечный результат, вопросы компоновки сечений не рассматриваются, а для центрально-, внецентренно-сжатых и сжато-изогнутых элементов при компоновке их сечений используются разработанные алгоритмы, адаптированные для включения в пакет прикладных программ "ПОИСК", разработанный под руководством В.А.Пермякова для оптимального проектирова-

ния стальных стержневых конструкций.

На примерах проектирования предварительно-напряженной шпунгельной балки и двухпролетной фермы, в состав которых включены составные элементы показана необходимость учета условий компоновки поперечных сечений сжатых стержней при оптимальном проектировании конструкций с заданной геометрической схемой и выявлено влияние этого обстоятельства на геометрические параметры, которые, как было доказано предыдущими исследованиями, весьма чувствительны к заданным условиям проектирования. В обеих задачах отмечено снижение массы конструкций /на 4-19%/ по сравнению с исходными вариантами, для которых геометрические характеристики сечений принимались приближенно.

Выполнено опытное проектирование комбинированной предварительно-напряженной системы типа "арка с затяжкой", исходные данные для которого приняты по данным реального объекта. Решены четыре задачи, отличающиеся между собой количеством искомых переменных и методами поиска поперечных сечений отдельных элементов.

В задаче 1 геометрическая схема системы принята заданной, а размеры поперечных сечений корректировались приближенно на каждом шаге итерационного расчета по текущим значениям расчетных усилий, возникающим от двух неблагоприятных загрузений конструкции покрытия, с использованием удельных характеристик  $\rho = i\sqrt{A}$  и  $C = i^2 / h^2$ , значения которых найдены по сортаментному ряду прокатных профилей. Полученная масса системы для дальнейшего сравнения принята за 100%.

В задаче 2 отыскивалась оптимальная высота конструкции в коньковом узле при тех же условиях проектирования. Увеличение высоты арки /на 4,2м по сравнению с исходным проектом/ привело к значительному уменьшению усилий в арке и затяжке, что отразилось на массе конструкции, которая снизилась на 9%.

В задаче 3 варьировались координаты всех узлов /с учетом их симметрии/, что позволило дополнительно снизить массу конструкции на 5,4% по сравнению с проектом, полученным в задаче 2, и на 18% по сравнению с исходным.

Задача 4 отличалась тем, что с целью выявления влияния на конечный результат методов компоновки поперечных сечений элементов, ее решение найдено с учетом разработанных алгоритмов, используемых на каждом шаге итерационного расчета. При соблюдении условий, принятых в задаче 3, масса снизилась еще на 7,4% и

по сравнению с исходным проектом экономия стали достигла 22,3%.

Анализ полученных результатов демонстрирует с одной стороны эффективность поиска оптимальных параметров геометрической схемы конструкции, а, с другой, необходимость поиска оптимального распределения усилий и оптимальных геометрических параметров в комплексе с оптимизацией размеров поперечных сечений элементов. Этот вывод отличается новизной тем, что в определенной степени опровергает сложившееся мнение о том, что к компоновке сечений достаточно обращаться только после решения задачи оптимизации параметров конструкции либо использовать приближенные соотношения между текущими значениями расчетных усилий и характеристиками сечений. Если последнее обстоятельство можно принять при проектировании конструкций из прокатных профилей, то для составных сечений такой подход нельзя признать справедливым. Компоновка составных сечений на каждом шаге оптимизационного расчета по текущим значениям расчетных усилий позволяет правильно назначать жесткость элементов стержневой системы, необходимые для выполнения статического расчета, что отражается и на параметрах геометрической схемы конструкции.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны алгоритмы прямого безитерационного подбора поперечных сечений центрально- и внецентренно-сжатых стержней, построенные на реализации признаков оптимальности, связанных с обеспечением равноустойчивости стержней относительно главных осей и максимальной тонкостенности элементов сечения при заданных расчетных усилиях. Алгоритмы отличаются строгостью соблюдения требований норм проектирования, пригодностью во всем возможном диапазоне варьирования исходными данными.

Применение разработанных алгоритмов компоновки сечений существенно сокращает трудоемкость вычислительных операций при высокой степени рациональности полученного результата.

2. Выявлены закономерности изменения оптимальных условных гибкостей сжатых стержней и распределения материала между элементами составных сечений в зависимости от значений расчетных усилий, расчетных длин и используемой стали. Для центрально-сжатых стержней выведены выражения для определения оптимальных расчетных сопротивлений стали, выбор которых рационален при

проектировании двутавровых, коробчатых и крестообразных сечений.

3. Разработана процедура определения геометрических характеристик составных двутавровых сечений центрально- и внецентренно-сжатых элементов, основанная на предлагаемых алгоритмах компоновки сечений, реализованная в виде подпрограммы вычислительного комплекса "Поиск", предназначенного для оптимального проектирования стальных стержневых конструкций.

4. Доказана необходимость поиска оптимального распределения внутренних усилий и оптимальных параметров геометрической схемы конструкции с одновременной оптимизацией размеров поперечных сечений, что опровергает сложившееся мнение о том, что к подбору сечений достаточно обращаться только после решения задачи оптимизации параметров стержневой системы либо использовать в процессе решения задачи оптимизации приближенные зависимости между текущими значениями расчетных усилий и геометрическими характеристиками сечений.

На примерах проектирования различных объектов продемонстрирована возможность значительной экономии затрат материала не только за счет оптимизации параметров стержневой конструкции, но и за счет оптимизации распределения стали между элементами составных поперечных сечений.

5. Сопоставление результатов проектирования сжатых стержней, выполненных в соответствии с требованиями СНиП II-23-81<sup>А</sup> и Еврокод-3, показало, что площади поперечных сечений, найденные по европейским нормам, значительно на II-40% превышают аналогичные показатели для стержней, спроектированных по отечественным нормам.

Основные положения диссертации изложены в печатных работах:

1. Пермяков В.А., Бу Салех Наджи. Прямой метод компоновки поперечных сечений центрально-сжатых стержней. Ки в. Гос. техн. ун-т строительства и архитектуры. - Киев: 1996. - 13 с. - Дел. в ГНТБ Украины ІЗ.03.96, № 773 УК96.

2. Пермяков В.А., Бу Салех Наджи, Нилова Т.А. Алгоритм прямого подбора сечений центрально-сжатых стержней при оптимальном проектировании конструкций /52-я научно-техн. конф. КИСИ.

- Київ: 1991. - с.77-78.

3. Пермяков В.А., Амрани Махфуд, Бу Салех Наджи. Компонівка двутаврових поперечних сечень елементів при оптимальному проектуванні сталевих стержневих конструкцій /пятая укр. научн.-техн. конференция по металлическим конструкциям: Тезисы докладов.1992. -Київ. -с.85-86.

## А Н О Т А Ц І Я

Бу-Салех Н.Ф. "Оптимізація складених поперечних перерізів елементів сталевих конструкцій".

Дисертація являється рукописом на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук. Спеціальність 05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди. Київський державний технічний університет будівництва і архітектури, м.Київ, 1996.

Запропоновано безітераційні алгоритми компоновки поперечних перерізів центрально- та позцентрово-стиснутих елементів, що базуються на реалізації вимог оптимальності з урахуванням норм проектування різних країн. Розроблені алгоритми використані при оптимальному проектуванні стержневих конструкцій.

Ключові слова: компоновка перерізів, максимальна тонкостійкість, рівностіжкість, умовна гнучкість, оптимізація конструкцій.

Bou Saleh N. F. "Optimization of the composite cross sections of elements in steel structures".

Dissertation is the form of manuscript for the application of the Doctor of philosophy (ph.D ) degree in technical sciences on 05.23.01. Speciality - Building structures, buildings and constructions. Kyiv state technical university of civil engineering and architecture, Kyiv, 1996.

An analysis without successive approximations have been proposed for integration cross sections of compressive and beam-column elements, that based on realizing all demands of improvements in accordance with various national building codes. In this way a method have been developed suitable for optimal design of steel bar structures.

Підп. до друку 22.11.96 Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папір друк. № 1. Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 10.  
Умовн. фарбо-відб. 20. Обл.-вид. арк. 10.  
Тираж 100. Зам. № 6-3588.

---

Фірма «ВІПОЛ»  
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

275591

**AB 36.388**