

УДК 539.3:539.4

**ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Овчинников Илья Игоревич,

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов; Сочинский филиал Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство»

Аннотация

В статье на основе анализа ряда работ рассмотрены современные тенденции в оптимальном проектировании металлических конструкций и показано, что они сводятся к использованию вероятностных и многокритериальных моделей оптимального проектирования. Описаны критерий энергоемкости и критерий надежности, которые используются для решения прикладных задач оптимизации металлических конструкций. Рассмотрены градиентные методы поиска оптимального решения, метод оптимизации Нелдера-Мида, различные вариации метода случайного поиска, а также генетические алгоритмы, которые начинают находить все более широкое применения для решения задач оптимизации. Особое внимание уделено проблеме оптимального проектирования конструкций с учетом воздействия коррозионной среды.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, металлические конструкции, коррозионная среда

**THE PROBLEMS OF OPTIMAL DESIGN OF METAL STRUCTURES
SUBJECT OPERATION CONDITIONS**

Ovchinnikov Ilya Igorevich,

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov; Sochi Branch of the State Technical University – MADI,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Transport construction»

Abstract

On the basis of the analysis of a number of studies examined the current trends in the optimal design of metal structures and demonstrated that they are reduced to the use of probabilistic models and multicriteria models of optimal design. Described criterion energy consumption and reliability criteria that are used for applications optimization of metal structures. Considers gradient methods for finding the optimal solutions, optimization method Nelder-Mead, different variations of the method of random search, and genetic algorithms, which are beginning to find increasing use for solving optimization problems. Particular attention is paid to the problem of optimal design of structures for the effects of the corrosive environment.

Keywords: optimal design, metal design, corrosive environment

Введение. Задачи оптимального проектирования металлических конструкций обычно формулируются как задачи поиска таких значений выбранных параметров конструкций, которые обеспечивают наименьшее (или наибольшее) значение выбранного критерия оптимальности в области допустимых проектных решений. В большинстве работ по оптимизации металлических конструкций рассматриваются параметрические задачи, ограниченные предварительным заданием конструктивной формы с возможностью изменения ее параметров. Дальнейшее развитие теории оптимального проектирования металлических стержневых систем предусматривает решение задачи поиска оптимальной топологии конструкции и формы сечений ее элементов при переменных параметрах системы. Такие задачи относят к задачам структурно параметрической оптимизации, в таких задачах одновременно присутствуют переменные и непрерывного и

дискретного типов. Для решения этих задач могут использоваться как детерминированные, так и вероятностные модели оптимизации. В последнее время с целью приближения постановок оптимизационных задач к реальности в них стали учитывать деструктирующее воздействие эксплуатационной среды.

О постановке прикладных оптимизационных задач. Теория оптимального проектирования конструкций относится к одному из наиболее быстроразвивающихся разделов механики деформируемых сред и строительной механики. Она сочетает достижения в области теории упругости и теории пластичности с теорией оптимизации, в результате чего разрабатываются методики целенаправленного проектирования металлоконструкций и формы упругих тел, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. При этом возможны одноцелевые и многоцелевые конструкции по числу одновременно поставленных к ним требований. Часто целями проектирования служат минимальная масса и минимальная стоимость конструкций. Одновременно формулируются ограничения на податливость, геометрию, собственную частоту колебаний конструкций и тому подобное, которые играют важную роль в теории оптимального управления [1].

В общем случае постановка задачи оптимального проектирования конструкций включает целевую функцию, или критерий качества проекта, определенное количество независимых параметров проекта и определенные ограничения, которые в той или иной форме отражают линейные или нелинейные взаимосвязи между параметрами проекта. Опытные проектировщики стараются сформулировать постановку задачи оптимизации, учитывая возможности ее решения, что является причиной появления различных моделей, постановок и методик решения задач оптимального проектирования конструкций.

Вид функции цели определяет и постановку задачи оптимизации: детерминированную однокритериальную, детерминированную многокритериальную и вероятностную. Чаще всего используются

детерминированные постановки, когда задается определенный критерий оптимальности конструкции, в той или иной степени характеризующий ее эффективность. В качестве такого критерия обычно используют минимум веса (материалоемкость), минимум стоимости, энергоемкость конструкции. В последнее время в связи с рассмотрением жизненного цикла конструкции начинают использовать критерий приведенных затрат, учитывающий расходы не только на этапе создания конструкции, но и на этапе ее эксплуатации.

Многочисленные примеры расчета [2] показывают, что при оптимизации конструкций с заданной геометрической схемой достаточно надежные результаты получаются при использовании самых простых критериев оптимальности, как-то: масса (объем) или стоимость.

В случае же, когда в процессе оптимизации геометрическая схема конструкции может меняться, результаты оптимизации могут зависеть от принятого критерия оптимальности, поэтому его формулировке необходимо уделять особое внимание, стараясь сделать его более обобщенным.

В работе [3] для решения задач структурно-параметрического синтеза предложено применять коэффициент использования материала, в качестве которого используется отношение энергии действительного деформирования конструкции к предельно допустимой потенциальной энергии деформирования. По сути дела это критерий энергоемкости конструкций, и в указанной работе он используется для экспертной оценки наиболее рациональных проектных решений конструкций с изменяющимися геометрическими и структурными параметрами. Авторами работы [4] этот коэффициент трактуется как коэффициент полезного действия, оценивающий эффективность конструкции по отношению к процессу преобразования работы внешних сил в потенциальную энергию деформирования.

При использовании вероятностного подхода к оптимальному проектированию обычно учитывается изменчивость внешних воздействий, случайная природа геометрических и механических характеристик конструкции, временной фактор и используется критерий надежности, как

вероятности того, что параметры конструкции за время ее эксплуатации не выйдут из области допустимых значений. Использование вероятностного подхода требует накопления достаточно больших объемов экспериментальной информации для их последующей статистической обработки, что пока еще несколько ограничивает применимость этого подхода.

Как уже отмечалось, основным показателем эксплуатационной надежности конструкций является вероятность безотказной работы, которую в задачах оптимального проектирования рассматривают как функцию времени, проектных параметров конструкции и параметров системы технического обслуживания, контроля и ремонтов на стадии эксплуатации. При наличии достаточного количества статистических данных о поведении конструкций, полученных в процессе обследования, данных о статистике отказов элементов конструкций, кинетике появления и развития дефектов и повреждений в них при моделировании эксплуатационной надежности конструкций могут использоваться два подхода.

Первый подход основывается на использовании теории цепей Маркова, когда рассматривается изменение эксплуатационного состояния конструкции как процесс перехода из одного устойчивого состояния в другое. При этом можно выделять несколько состояний, или фаз эксплуатации конструкции, например: исправное, работоспособное, ограниченно работоспособное, неработоспособное.

Второй подход основывается на использовании вероятностных критериев прочности, жесткости, устойчивости конструкций. Например, в статье [5] сформулированы условия прочности и жесткости стальных балок, учитывающие случайную природу внешних нагрузок и стохастичность свойств материала. Проблемы математического моделирования эксплуатационной надежности металлических конструкций рассмотрены в работе [6], где отмечается, что конкретизация модели эксплуатационной надежности конструкций проводится в терминах многошаговых задач дискретной

оптимизации комбинаторного типа, для решения которых применяют различные схемы метода случайного поиска.

В последнее время в задачах оптимизации металлоконструкций стал использоваться критерий надежности. Например, в статье [7] рассматривается задача минимизации полных ожидаемых затрат в течение жизненного цикла стального резервуара (стоимости его возведения и эксплуатации), для которого назначаются такие значения проектных параметров и такая система технического обслуживания, контроля и ремонтов в течение заданного срока службы, при которых достигается компромисс между проектной массой и эксплуатационной надежностью резервуара. Практически невозможно учесть и количественно оценить все негативные факторы, влияющие на техническое состояние резервуара в течение эксплуатации, поэтому модель его надежности разрабатывается с использованием статистической информации об отказах, дефектах и повреждениях, полученной в процессе обследования подобных резервуаров.

Г.А. Гениевым [8] рассмотрены общие принципы и методики оптимизации комбинированных многоэлементных систем по критерию минимальной вероятности их отказа при фиксированной стоимости общих материальных затрат, причем рассмотрены такие виды комбинированных систем, для которых отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы в целом. К таким относятся статически определимые многоэлементные конструкции и статически неопределимые комбинированные конструкции, для которых отказ одного из элементов делает невозможным их дальнейшую эксплуатацию.

Задачи многокритериальной оптимизации характеризуются критерием оптимальности в виде вектора показателей эффективности проектного решения. Они открывают возможность для исследования широкого круга альтернативных проектов с различными целевыми функциями и выбора компромиссного решения при противоречивых требованиях. Такая постановка

в наибольшей степени отвечает задачам проектирования, результаты которого в общем случае зависят не от одного, а от многих критериев.

Вопросам многокритериальной оптимизации конструкций посвящен цикл работ Ю.М. Почтмана с сотрудниками [9, 10, 11].

Проблемы формализации многокритериальных свойств ряда прикладных задач оптимального проектирования конструкций, выбора соотношения между достаточной полнотой и меньшей сложностью расчетных моделей и возможностями процедур оптимизации определяют содержание этапов постановки задачи и обоснование методов численной реализации проектов. При анализе векторных критериев качества возникают трудности, связанные с тем, что частные критерии могут находиться на различных иерархических уровнях системы оценки проектов конструкции. Учет такой иерархичности требует построения и использования соответствующих моделей и методов решения задач оптимального проектирования конструкций

В статье [11] рассмотрены вопросы формализации процедур решения многокритериальных задач оптимизации, основанных на использовании информации об объектах, аналогичных проектируемым. Для расчета весовых коэффициентов скалярных целевых функций использована аксиоматика компромисса многокритериальных задач векторной оптимизации конструкций. Кроме расчета коэффициентов, предложена процедура вывода свертки частных критериев методами самоорганизации математических моделей.

В работе [12] рассмотрена постановка задачи выбора оптимальных параметров металлических конструкций с учетом нескольких критериев оптимальности и предложена методика ее решения на базе формирования множества допустимых проектных решений. Оптимальное решение задачи принимается как одна из точек множества Парето.

В статье [13.] рассмотрена задача поиска оптимальной геометрии нижнего пояса консольной фермы и площадей поперечных сечений ее элементов по критериям минимума объема материала и минимума накопленной энергии деформации системы. При этом векторный критерий преобразуется в

скалярный с помощью свертки с использованием коэффициентов важности критериев и решений однокритериальных задач. Применение метода динамического программирования [14, 15] позволило свести задачу оптимизации со многими переменными к решению последовательности задач меньшей размерности.

В статье [16] приводится методика решения многокритериальной задачи оптимизации размеров поперечных сечений элементов металлических конструкций, в основе которой лежит алгоритм определения оптимальных в смысле Парето множеств проектных решений, реализующая метод последовательных уступок и направленный перебор всех комбинаций дискретных значений переменных проектирования. В качестве целевых функций рассмотрены минимум объема (веса) материалов, минимум трудоемкости изготовления элементов и максимум жесткости (моментов инерции) сечений. При этом задача поиска оптимального сечения заданного типа сведена к выбору из сортамента металлопроката дискретных значений переменных проектирования, удовлетворяющих нескольким критериям качества и обеспечивающих выполнение требований норм проектирования, а также условий технологичности изготовления и монтажа. Эта методика реализована в системе автоматизированного проектирования стальных конструкций.

Рассмотренные выше вероятностные и многокритериальные постановки довольно интересны, но их широкое применение сдерживается отсутствием соответствующей информационной базы.

О методах решения задач оптимизации металлических конструкций.

В случаях, когда критерий качества и ограничения математической модели является непрерывно дифференцируемыми функциями, а область поиска является гладкой, параметрические задачи оптимизации металлических конструкций можно достаточно эффективно решать с помощью градиентных методов. При этом поиск оптимальных значений параметров конструкции осуществляется при заданных топологии конструкции, типах поперечных

сечений ее элементов, условиях опирания, характере соединения элементов и схеме и программе нагружения. Градиентные методы основываются на итерационном построении последовательности проектов, которая обеспечивает сходимость к проекту с минимальным значением функции цели. Начальное приближение представляет собой инженерную оценку рационального проекта, а затем на основе анализа локального поведения функции цели определяется направление, вдоль которого происходит наиболее быстрое ее уменьшение. Затем данное направление проецируется на линейризованную в этой точке поверхность активных ограничений и осуществляется небольшой шаг в направлении этой проекции при одновременной ликвидации нарушений линейризованных ограничений в этой точке.

Численный метод оптимизации Нелдера-Мида или метод деформированного многогранника, базирующийся на использовании аппарата нелинейного программирования, отличается высокой надежностью, не требует непрерывности функционала и вычисления его производных, хорошо зарекомендовал себя при проектировании строительных конструкций [17, 18]. Хотя метод Нелдера-Мида не обеспечивает строгого математического решения задачи оптимизации, однако он нагляден и позволяет учесть то количество факторов, которое способно приблизить задачу до практического применения и достичь существенного экономического эффекта. Метод находит локальный экстремум и может «застрять» в одном из них. Более развитый подход к исключению локальных экстремумов предлагается в алгоритмах, основанных на методе Монте-Карло, а также в генетических алгоритмах.

Моделирование различных объектов оптимизации, в том числе строительных конструкций, на базе использования случайных и псевдослучайных численных последовательностей положено в основу метода оптимизации, получившего название метода случайного поиска. Методы случайного поиска иногда называют методами статистических испытаний из-за того, что в их основе сбор информации о поведении целевой функции путем случайного перебора различных возможных состояний. Такая случайная

процедура характерна для методов статистических испытаний. Фундаментальные исследования в области методов случайного поиска выполнены в работах Растригина Л.А.[19, 20, 21, 22], где автор рассматривает локальные свойства различных алгоритмов случайного поиска, в основном тех, которые локально адаптируются, приводятся оценки эффективности рассматриваемых алгоритмов, исследуется поведение шаговых алгоритмов случайного поиска, работа поиска с учетом препятствий, рассматриваются вопросы самообучения в процессе случайного поиска (покоординатного, когда изменяются свойства вероятности вдоль каждой из управляющих координат, и непрерывного, при котором преобладающее направление поиска может быть любым).

При решении структурно параметрических задач оптимального проектирования большинство исследователей предпочитают методы, в которых реализуется целенаправленный перебор конечного множества вариантов проектных решений. К числу таких методов, в частности, относятся генетические алгоритмы, основанные на моделировании генетических процессов биологических организмов и эволюционного развития популяций. Генетические алгоритмы [23, 24, 25] являются одними из современных методов структурной и параметрической оптимизации конструкций, которые позволяют получить близкие к глобальному оптимуму проектные решения и находят все большее применение на практике. Генетический алгоритм использует некоторое кодирование множества искомых параметров системы вместо значений этих параметров, поэтому его можно применять для решения задач дискретной оптимизации. При этом искомые параметры задают как на числовых множествах, так и на конечных множествах произвольной природы. Стратегия поиска в таких алгоритмах построена на вычислении и сравнении значений некоторой функции оценки проектных решений в точках пространства поиска. При этом требования унимодальности, непрерывности, дифференцируемости этой функции не выдвигаются. Это обуславливает

возможность использования генетического алгоритма для широкого класса функций, в том числе для функций, не имеющих аналитического описания.

Статья [26] посвящена обзору работ, в которых при реализации задач оптимального проектирования конструкций были использованы генетические алгоритмы. Автор показал, что, несмотря на ограниченность в применении генетических алгоритмов из-за значительного объема прямых расчетов напряженно деформированного состояния системы, этот метод находит все большее распространение на практике.

В статье [27] рассматривается задача оптимального проектирования ферм с помощью генетического алгоритма, причем в качестве переменных параметров принимаются площади поперечных сечений стержней и координаты узлов фермы. В систему ограничений включены ограничения прочности стержней и перемещений узлов, а также уравнения равновесия метода конечных элементов. На ряде примеров показана эффективность генетических алгоритмов для данного класса конструкций.

В работе [28] показано применение генетических алгоритмов для решения задач оптимизации ферм по критерию минимума веса с учетом ограничений прочности, устойчивости и жесткости. Переменные проектирования задачи оптимизации включают количество стержней, их площади поперечных сечений и координаты узлов фермы. Описанные свойства генетических алгоритмов, с одной стороны, обеспечивают их высокую работоспособность, а, с другой, из-за значительного объема вычислений замедляют его работу по сравнению с другими методами. Кроме того, с увеличением количества переменных проектирования сильно возрастает размер области поиска. Вероятность попадания в окрестность глобального минимума функции многих переменных существенно уменьшается, и итеративный процесс затормаживается.

Одним из направлений улучшения работы эволюционных методов оптимизации является использование гибридных генетических алгоритмов, сочетающих свойства генетических алгоритмов и других методов оптимизации,

например [29, 30]. В этих случаях начальное приближение, локализуемое в области экстремума функции цели, находится с использованием генетического алгоритма, а затем уже более точное положение экстремума уточняется с помощью градиентного метода. В этом случае ускоряется сходимость итеративного процесса поиска и повышается точность нахождения оптимума. Эффективный гибридный поисковый метод оптимизации с адаптивным управлением вычислительным процессом предложен в работе [31]. В основе этого метода лежит идея гибридизации, которая состоит из того, что на заданном наборе поисковых методов, каждый из которых эффективно решает свой узкий класс задач, организуется методика, которая при изменении ситуации благодаря адаптивному управлению, однозначно вводит в процесс поиска один или несколько методов из принятого набора. Такой гибридный метод может эффективно решать более широкий класс задач, чем каждый из этих методов. Так как гибридный метод обеспечивает минимальное количество проверок выполнения ограничений, то его применение оказывается особенно эффективным в тех случаях, когда ограничения или целевая функция заданы алгоритмически и заранее неизвестно расположение границ и линий уровня, а также когда ограничения или функция цели представляют собой сложно вычисляемые функции.

Оптимальное проектирование конструкций с учетом воздействия агрессивных сред. Последние достижения механики разрушения позволяют учитывать изменение от времени внутренних свойств, определяющих работоспособность конструкции в среде с переменными воздействиями. В связи с этим возникают новые оптимизационные задачи, формулируемые с учётом процессов накопления повреждений той или иной природы.

При анализе поведения конструкций, находящихся под действием переменных (детерминированных, стохастических) нагрузок с учётом процессов накопления повреждений различной природы первостепенное значение имеет задача оценки времени накопления величины повреждения от начального до некоторого предельного значения. Общие подходы к

исследованию подобных задач рассмотрены в работах В.В. Болотина, С.А. Тимашева [32, 33].

К числу фундаментальных работ, посвященных оптимальному проектированию конструкций с учётом воздействия агрессивной среды, являются работы И.Г. Овчинникова, Ю.М. Почтмана [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44].

Первой работой, посвященной проблеме оптимального проектирования конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред, вероятно, следует считать исследование И.Г. Овчинникова [45], которым была решена задача весовой оптимизации гладкой цилиндрической оболочки, подверженной атмосферной коррозии. Достаточно простая модель коррозионного износа позволила получить решение задачи в аналитическом виде. Позднее для той же конструкции были рассмотрены более сложные модели коррозионного износа, требующие учёта влияния напряжений [46, 38]. В то же время в качестве критериев оптимальности стали рассматриваться средняя скорость потери массы, долговечность и стоимость.

Значительное внимание проблеме оптимального проектирования корродирующих конструкций по критерию надёжности уделено в работах М.М. Фридмана [47]. Обсуждению проблемы многокритериального подхода к решению задач оптимизации конструкций с учётом влияния агрессивных сред посвящена работа [48]. Здесь проанализированы различные модели многокритериальной оптимизации и методы их реализации. Выбору оптимальных параметров стержней и стержневых систем, подверженных коррозионному воздействию посвящены работы [49, 50]. Здесь рассмотрены различные виды рабочих агрессивных сред и различные виды стержней.

Одним из наиболее распространенных и эффективных численных методов решения задач механики деформируемого твердого тела, в том числе и задач оптимального проектирования конструкций, работающих в агрессивных средах, является метод конечных элементов (МКЭ). Исследования в данном направлении активно проводились и проводятся в настоящее время в работах

[37, 50,51]. Полученные в этих работах результаты заложили научные и организационные основы оптимального проектирования и технической диагностики строительных конструкций. В качестве метода оптимизации в этом случае использовались градиентные методы [52], методы случайного поиска [53], методы штрафных функций [54]. В целом состояние проблемы оптимального проектирования конструкций с использованием МКЭ достаточно полно изложено в [55, 56].

С одной стороны, использование МКЭ позволяет рассмотреть широкий класс конструкций с произвольной геометрией, граничными условиями и условиями нагружения; исследовать наиболее общие случаи коррозионного взаимодействия; использовать в качестве варьируемых параметров параметры конечных элементов (или групп конечных элементов). С другой – такой подход существенно усложняет процедуру решения оптимизационной задачи из-за необходимости на каждом шаге поиска оптимального проекта многократно обращаться к процедуре МКЭ при численном решении задачи Коши.

Поэтому в ранних работах рассматривались такие конструкции, расчётная схема которых позволяла обойтись минимальным количеством КЭ при максимально возможном шаге интегрирования решения задачи Коши, что позволяло уменьшить размерность решаемой задачи и число обращений к процедуре МКЭ. При этом для решения оптимизационной задачи использовался метод случайного поиска.

В других подходах предлагалось оптимальные параметры конструкции определять без учёта влияния агрессивной среды с последующим их наращиванием на величину, определяемую заданным сроком эксплуатации, уровнем нагружения и параметрами агрессивной среды, путём решения обратной задачи Коши [57]. Такой алгоритм позволил из одного решения оптимизационной задачи для нейтральной среды получить семейство оптимальных решений. Однако, применение такого подхода возможно не для всех классов конструкций и лишь в том случае, когда момент исчерпания несущей способности определяется только ограничениями по прочности и

число варьируемых параметров равно числу конечных элементов. В работе [51] предлагается на начальных итерациях решения оптимизационной задачи использовать аналитические формулы для приближенного вычисления долговечности конструкции, что позволяет существенно повысить эффективность численных алгоритмов решения задачи нелинейного программирования.

Заключение. Проведенный анализ показывает, что проблема оптимального проектирования конструкций с учетом воздействия агрессивных сред наиболее интенсивно разрабатывается в России и в Украине.

Обзор работ, приведенный выше, не претендует на полноту изложения из-за ограниченности объема статьи и носит локальный характер. Однако, по мнению автора, он иллюстрирует значительный интерес ученых к данной проблеме, а также возможные оригинальные пути ее решения.

Библиографический список:

1. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л.С., Болтянский В.К., Гармкелидзе Р.В. и др. М.: Наука, 1969. 366 с.

2. Рейтман М.И., Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел. Постановки и способы решения задач оптимизации параметров элементов конструкций. М.: Наука, 1976. 258 с.

3. Герасимов Е.Н., Дышкант А.В. Коэффициент использования материалов в задачах структурно-параметрического синтеза // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация: Межвуз. сб. М.: Товарищество научных изданий КМК, 1997. С. 43-50.

4. Бараненко В.О., Седлецька О.В. Аналіз проектів елементів механічних систем за критерієм енергоємності // Вісник ПДАБіА: Науковий та інформаційний бюлетень. Днепропетровск, 2002. № 8. С. 7-16.

5. Пічугін С.Ф., Махінько А.В. Імовірнісна процедура підбору поперечного перерізу сталевих прогонів за критерієм міцності і жорсткості //

Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Ровно: Изд-во РДТУ, 2003. Вып. 10. С. 155-163.

6. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Киев: НИИ «Проектстальконструкция», 1999. 212 с.

7. Егоров Е.А., Семенец С.С. Оптимальное проектирование стальных резервуаров для нефтепродуктов с учетом надежности // Вісник ПДАБіА: Науковий та інформаційний бюлетень. Днепропетровск, 2004. №3. С. 18-23.

8. Гениев Г.А. Вопросы оптимизации расхода материалов в многоэлементных системах с позиций минимальной вероятности их отказа // Известия вузов. Строительство. 2002. № 1-2. С. 17-22.

9. Почтман Ю.М. Модели и методы многокритериальной оптимизации конструкций. Днепропетровск. ДГУ, 1984. 132 с.

10. Почтман Ю.М., Герасимов Е.Н., Скалозуб В.В. Многокритериальная оптимизация конструкций. Киев: Вища школа, 1984. 134 с.

11. Скалозуб В.В. Параметризация задач векторной оптимизации конструкций // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: Зб. наук. праць. Днепропетровск: Навчальна книга, 1997. Т. 2. С. 92-98.

12. Бузало Н.А. Возможный вариант решения задачи оптимизации металлических конструкций // Теория и практика металлических конструкций: сб. тр. междунар. конф. Макеевка: ДГАСА, 1997. Т. 2. С. 107-109.

13. Бараненко В.О. Багатокритеріальні задачі синтезу ШСС та динамічне програмування // Вісник ПДАБіА: Науковий та інформаційний бюлетень. Дніпропетровськ, 2000. №10. С. 4-12.

14. Почтман Ю.М., Бараненко В.А. Динамическое программирование в задачах строительной механики. М.: Стройиздат, 1975. 110 с.

15. Бараненко В.А., Почтман Ю.М., Филатов Г.В. О совместном использовании методов динамического программирования и случайного поиска в задачах оптимального проектирования // Строительная механика и расчет сооружений. 1973. №2. С. 3-6.

16. Холопов И.С., Попов А.Н. Многокритериальная оптимизация элементов металлических конструкций в условиях САПР // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр. 1999. С. 226-234.
17. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование: Механические системы и конструкции. М.: Мир, 1988. 428 с.
18. Банди Б. Методы оптимизации. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
19. Растрингин Л.А. Статистические методы поиска. М. Наука, 1968. 376 с.
20. Растрингин Л.А. Этот случайный, случайный, случайный мир. М.: Молодая гвардия, 1974. 207 с.
21. Растрингин Л.А. Случайный поиск – специфика, этапы истории и предрассудки // Вопросы кибернетики. Проблемы случайного поиска. М.: Наука, 1978. С. 3-17.
22. Растрингин Л.А., Рипа К.К., Тарасенко Г.С. Адаптация случайного поиска. Рига: Зинатне, 1978. 243 с.
23. Gen M., Cheng R. Genetic Algorithms and Engineering design. New York: John Wiley & Sons, 1997. 352 p.
24. Haupt R., Haupt S. Practical Genetic Algorithms. New York: John Willey & Sons, 1998. 177 p.
25. Юрьев А.Г., Ключев С.В., Ключев А.В. Оптимизация строительных конструкций на основе генетического алгоритма // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. №1. С. 61-64.
26. Бараненко В.О. Генетичні алгоритми в оптимальному проектуванні конструкцій. Огляд // Вісник ПДАБіА: Науковий та інформаційний бюлетень. Днепропетровск, 2002. № 10. С. 4-9.
27. Czarnecki S. Multithreaded genetic program in truss shape optimization // Теоретичні основи будівництва. Theoretical Foundations of Civil Engineering / Придніпровська державна академія будівництва; Warsaw university of technology faculty of Civil engineering; под ред. В. Шесняк, В.И. Большаков. Warsaw, 2000. Вып. 8. С. 556-560.

28. Burczynski T., Kus W., Orantek P. Optimization of plane truss structures using evolutionary algorithm // Computer assisted mechanics and engineering sciences. 2002. Vol. 9. P. 3-20.

29. I-Cheng Y. Hybrid Genetic Algorithms for optimization of truss structures // Computer aided civil and infrastructure engineering. 1999. Vol. 4. P. 199-206.

30. Пермяков В.О., Юрченко В.В., Пелешко І.Д. Оптимальне проектування металевих стержневих конструкцій на базі гібридного генетичного алгоритму // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Ровно: Изд-во НУВГП, 2008. Вып. 16. Ч. 2. С. 303-310.

31. Шелудько Г.А., Шупіков О.М., Сметанкіна Н.В., Угрімов С.В. Прикладний адаптивний пошук. Харьков: Око, 2001. 192 с.

32. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.

33. Тимашев С.А. Надёжность больших механических систем. М.: Наука, 1982. 184 с.

34. Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. Расчёт и рациональное проектирование конструкций, подвергающихся коррозионному износу // Физико-химическая механика материалов. 1991. № 2. С. 7-15.

35. Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа: расчёт и оптимизация. Днепропетровск: ДГУ, 1995. 192 с.

36. Овчинников И.Г. О задачах оптимального проектирования конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1988. № 9. С. 17-22.

37. Почтман Ю.М., Зеленцов Д.Г. Метод конечных элементов в задачах оптимального проектирования конструкций в условиях воздействия агрессивных сред // Theoretical Foundations in Civil Engineering. 1996. Vol. 1. P. 220-224.

38. Почтман Ю.М., Зеленцов Д.Г. Некоторые модели задач оптимизации конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами // Докл. АН УССР. 1987. Сер. А. № 2. С. 39-43.

39. Почтман Ю.М. Нелинейная оптимизация тонкостенных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // Нелинейная теория тонкостенных конструкций и биомеханика: труды I Всесоюзн. симпозиума. 1985. С. 382-385.

40. Почтман Ю.М., Фридман М.М. Оптимальное проектирование изгибаемых элементов конструкций при комбинированном подходе к учёту коррозии и защитных свойств покрытий // Theoretical Foundations of Civil Engineering. 2000. № 8. С. 518-521.

41. Почтман Ю.М., Харитон Л.Е. Оптимальное проектирование конструкций с учётом надёжности (обзор) // Строительная механика и расчёт сооружений. 1976. № 6. С. 8-15.

42. Почтман Ю.М., Алексеенко Б.Г., Зеленцов Д.Г. Оптимальное проектирование стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами, на основе метода конечных элементов // Сопротивление материалов и теория сооружений. 1991. № 59. С. 72-76.

43. Почтман Ю.М. Оптимизация стоимости и долговечности подкреплённых пластин, подверженных коррозионному износу // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1990. № 3. С. 10-13.

44. Почтман Ю.М., Алексеенко Б.Г. Оптимизация стоимости и долговечности стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1991. № 8. С. 14-17.

45. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. Саратов: Сарат. ун-т, 1987. 288 с.

46. Зеленцов Д.Г., Почтман Ю.М. Оптимизация долговечности и стоимости цилиндрических оболочек, подвергающихся механическому и химическому разрушению // Физико-химическая механика материалов. 1987. №4. С. 70-73.

47. Фрідман М.М. Концептуальні підходи при оптимальному проектуванні конструкцій, що функціонують в екстремальних умовах // Опір матеріалів і теорія споруд. 2002. № 70. С. 158-175.

48. Pochtman Yu.M., Fridman M.M. The complex approach by optimization the plane-stressed plates with holes, exploited in conditions of high temperatures // Lightweight Structures in Civil Engineering. Cracow, 2000. P. 81-83.

49. Губенко В.С., Почтман Ю.М., Криворучко Т.М. Определение оптимальных параметров и долговечности стержневых систем, подверженных воздействию агрессивной среды // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1988. № 3. С. 22-25.

50. Почтман Ю.М., Алексеенко Б.Г., Зеленцов Д.Г. Оптимальное проектирование стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами, на основе метода конечных элементов // Сопротивление материалов и теория сооружений. 1991. № 59. С. 72-76.

51. Зеленцов Д.Г., Кольчик С.В. Моделирование процесса коррозионного износа в задачах оптимального проектирования конструкций, использующих метод конечных элементов // Компьютерные методы в задачах прикладной математики и механики: сб. научн. трудов ИК НАН Украины. 1998. С. 40-47.

52. Зеленцов Д.Г., Солодка Н.А. Модели и методы снижения металлоёмкости стержневых конструкций, функционирующих в агрессивных средах // Системні технології: регіональний міжвузівський збірник наукових праць. 2000. Вып. 2(10). С. 90-96.

53. Філатов Г.В. Оптимальне проектування конструкцій методами випадкового пошуку. Днепропетровск: УДХТУ, 2003. 432 с.

54. Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю. Использование конечно-элементных моделей в задачах оптимизации корродирующих континуальных конструкций // Математичне моделювання: науковий журнал. 2004. № 2(12). С. 61-66.

55. Баничук Н.В. Введение в оптимизацию конструкций / отв. ред. В.П. Малков. М.: Наука, 1986. 302 с.

56. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции / пер. с англ. В.М. Картвелишвили, А.А. Меликяна; под ред. Н.В. Баничука. М.: Мир, 1983. 478 с.

57. Зеленцов Д.Г. Расчёт конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы. Днепропетровск: УГХТУ, 2002. 168 с.