

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ниязов Феруз Хушбоқович,

Институт предпринимательства и педагогики Денова, преподаватель
кафедры «Информационные технологии»

Хушбоқов Исмоил Уролмахаматович,

Институт предпринимательства и педагогики Денова, преподаватель
кафедры «Информационные технологии»

Норалийев Сардор Нурислом ўғли,

Институт предпринимательства и педагогики Денова, преподаватель
кафедры «Информационные технологии»

Дониёрова Гулшан Тошмирзайевна,

Институт предпринимательства и педагогики Денова, преподаватель
кафедры «Информационные технологии»

Нормуродов Садриддин Салим ўғли,

Институт предпринимательства и педагогики Денова, преподаватель
кафедры «Информационные технологии»

Аннотация. В работе приведены теоретические предпосылки и принципы построения систем автоматизированного проектирования для решения классов оптимизационных задач оболочечных конструкций. Совершенствование методов решения оптимизационных задач предполагается алгоритмизации оптимизационных моделей и алгоритмов для построения автоматизированной системы проектирования оболочечных конструкций на основе системного подхода и алгоритмических методов. На основе системного подхода исследованы вопросы внутренней организации таких систем, функции отдельных блоков и модулей, сквозной автоматизации процесса решения оптимизационных задач от постановки до получения численных результатов. Представлены результаты расчета

оптимизации цилиндрической оболочки, прямоугольной в плане, шарнирно-опертой по всему контуру, находящейся под равномерно распределенной нормальной нагрузкой.

Ключевые слово. Системный анализ, алгоритмизация, оптимизация, проектирование, конструкция, оболочки, пластин, модель, функция цели, минимизация, вес конструкции.

Abstract. The paper presents the theoretical prerequisites and principles for constructing computer-aided design systems for solving classes of optimization problems for shell structures. Improving the methods for solving optimization problems is supposed to be the algorithmization of optimization models and algorithms for building an automated system for designing shell structures based on a systematic approach and algorithmic methods. On the basis of a systematic approach, questions of the internal organization of such systems, the functions of individual blocks and modules, end-to-end automation of the process of solving optimization problems from setting to obtaining numerical results are investigated. The results of the calculation of the optimization of a cylindrical shell, rectangular in plan, hinged along the entire contour, under a uniformly distributed normal load, are presented.

Keywords. System analysis, algorithmization, optimization, design, construction, shells, plates, model, goal function, minimization, construction weight.

Введение. При постановке оптимизационных задач в области проектирования оболочечных и пластинчатых конструкций, можно встретить двойное истолкование (понимание) системного анализа (подхода): с одной стороны – это анализ любой реально существующей системы; с другой – формирование параметров системы для достижения поставленных целей. В реальных условиях эти две стороны неразрывны, поскольку нельзя создать систему, обеспечивающую поставленные цели, без анализа содержания и

определения реальных процессов, которые приведут к желаемому результату. Системный анализ обеспечивает условия совместной оптимизации, как структурных частей системы (ее подсистемы), так и системы в целом, а также программного обеспечения ЭВМ. Конечной целью использования системного анализа при проектировании является реальное проектирование системы, ее подсистем и компонентов для достижения оптимальных эффективности и экономичности. Несмотря на то, что в системном анализе отсутствуют строго определенные правила, основные признаки достаточно полно раскрыты в [5].

Методы и принципы исследования. С учетом специфики процесса проектирования оболочечных и пластинчатых конструкций и решаемых задач основные особенности системного подхода могут быть отображены следующими положениями [6]. Во-первых, в качестве оптимизируемой проектируемой оболочечных и пластинчатых конструкции принимается определенный, соответствующий выполнению функций, комплекс элементов, наделенный заданными свойствами и обладающий абстрактными связями с внешними условиями и системами. В этом комплексе в процессе исследований каждому элементу можно придавать желаемые свойства без учета реальных характеристик, чтобы выявить возможный вклад этих свойств в изучаемые процессы и, следовательно, обосновать требования к перспективному решению данного элемента. В практических задачах оптимизации принимается, что свойства элементов и их функционально-технические характеристики известных и поэтому процессы функционирования рассматриваются в области допустимых (с учетом принятых ограничений) решений систем. Как в первом, так и во втором, а также в случае программного обеспечения (разработка алгоритмических комплексов) оценка рассматриваемого комплекса производится с учетом совокупности известных процессов и явлений и взаимосвязи между ними. Все это выдвигает на первый план такие

особенности модели проектируемых инженерных конструкций и сооружений, которые способствуют выяснению механизма функционирования данного комплекса в целях выбора наименьшего веса или затрат. При этом, следует отметить, во всех случаях система включает понятие о целом, состоящем из взаимосвязанных, взаимодействующих и взаимозависимых частей. При этом свойства этих частей зависят от системы в целом, а свойства системы – от свойств её частей.

Во-вторых, для конкретной проектируемой оболочечной и пластинчатой конструкции должно быть определено место в общей структуре других систем. Системный подход требует обоснованного выделения исследуемой системы в общем составе систем, предназначенных для поддержания нормирующих параметров, разделения её на подсистемы.

Конструкции или сооружения составными или основными элементами, которых являются оболочки или пластин рассматриваются как самостоятельный объект изучения и оптимизации, но с учетом необходимого обмена информацией со смежными и внешними системами и внутри её – между подсистемами.

Выбранная общая структура систем должна четко очертить границы исследуемой системы и способствовать выделению (структуризации) таких её подсистем, которые по своим размерам доступны для исследований и однородны по описанию. Все это обеспечивает организацию связей на каждом очередном уровне спуска от системы к отдельным элементам сверху-вниз с последующей передачей полученной агрегированной информации вверх (снизу-вверх). При этом, как общей структуре систем компенсации, так и подсистемам конструкций и сооружений должны быть присущи свойства целостности: изменения, возникшие в какой-либо из их частей, сказываются как на других частях, так и на всей их совокупности.

В-третьих, инженерная конструкция или сооружения представляются в виде модели. При проектировании сложных систем, какими являются инженерные конструкции и сооружения типа пластин и оболочек, требуются знания о количественных и качественных закономерностях поведения системы и отдельных её элементов в зависимости от характера изменения многочисленных факторов (параметров).

Модель должна быть сходна с оригиналом, но и отличаться от него. Её отличительные особенности проявляются в том, что она подвергается таким преобразованиям в нужном направлении, которые невозможны при непосредственном исследовании оригинала.

Математическое моделирование позволяет изучать только те параметры оригинала, которые имеют математическое описание, адекватно отображающее поведение оригинала. При разработке модели очень важно освободиться от связей и отношений, которые затрудняют познание объекта исследований в соответствии с поставленными целями. При этом важно, чтобы ясные в своей основе идеи не обрастали тяжелыми и громоздкими подробностями.

Выбор модели является центральной частью работы по формированию методологии исследования и зависит от основной идеи, определяющей поиск экстремума функции цели.

Для решения ряда оптимизационных задач могут быть применены известные математические методы поиска экстремума функций нескольких переменных, например, в классической математике это решение системы линейных уравнений, полученных при приравнении нулю частных производных исследуемой функции по оптимизируемым параметрам, и метод неопределенных множителей Лагранжа. Эти методы справедливы при отсутствии ограничений на оптимизируемые параметры или при ограничениях в виде равенства.

При ограничениях в виде неравенства используются методы нелинейного математического программирования, подразделяемые по признаку организации процесса поиска по методу слепого и направленного поиска. К первому из них относятся метод сплошного перебора вариантов с их упорядочением по критериям эффективности и метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). К методу направленного поиска относятся градиентный, наискорейшего спуска, координатного спуска и т.д. Имеются и другие методы нелинейного программирования.

В конечном итоге выбор метода определяется с учетом многих соображений, из которых не последняя роль принадлежит удобству обращения к алгоритму, длительности счета и т.д. Очевидно также, что решение задач требует неформальных действий, возможности вмешиваться в процесс счета и получить промежуточные результаты для реализации диалогового режима.

Известно [5], что выбор модели во многом зависит от интуиции, опыта, навыков неформального мышления, от представлений о сути взаимосвязи входов и выходов для самой системы. При этом прежде всего следует уточнить задачи, решению которых должна способствовать модель. При постановке данной задачи модель должна обеспечивать: а) возможность обобщения любых исходных условий (факторов) в такую форму расчетной информации, которая существенно облегчает целенаправленный выбор конкурирующих вариантов конструкций и сооружений, состава подсистем и режимов их функционирования (НДС); б) исследование характера взаимосвязи определяющих параметров систем и подсистем в зависимости от условий функционирования объекта; в) представление определяющих параметров в виде координат состояния системы, использование которых позволяет вычислить любые технико-экономические показатели, как отдельной подсистемы, так и системы в целом.

Модель конструкции и сооружения может быть детерминированной по условию взаимосвязи входов и выходов для самой системы. Обойтись одной моделью практически не удастся, необходима система моделей - совокупность взаимосвязанных моделей отдельных подсистем. Система моделей должна создавать возможность самостоятельного решения отдельных задач без нарушения их последующего согласования с учетом всех связей между подсистемами.

В-четвертых, для оценки качества решений проектируемых конструкций и сооружений выбирается комплекс показателей. Как правило, цель системного анализа заключается в том, чтобы при всех возможных характеристиках внешних связей добиться наилучшего (оптимального) решения проектируемых конструкций и сооружений по их конструктивным, экономическим и другим показателям. Однако оптимум и оптимальность – не абсолютные понятия, они требуют точного определения критериев оптимальности, т.е. главных признаков, на основании которых производится сравнение эффективности различных решений.

Решение, наилучшее в одних условиях и по одному критерию, может оказаться далеко не лучшим в других условиях и по другому критерию. Оптимизация по одному критерию (субоптимизация) чаще всего для технических систем производится по приведенным и затратам (в настоящем исследовании в качестве целевой функции принят вес конструкции).

В пятых, результаты анализа на модели конструкций и сооружений должны переноситься на реальные системы. Для переноса решений на реальный объект требуется уверенность в адекватности решения. Адекватность оценивается аналогией свойств реального объекта и модели по основным признакам.

Адекватность достигается в том случае, если модель полностью отображает напряженно - деформируемое состояние (НДС) реально

существующих проектируемых конструкций и сооружений типа пластин и оболочек.

Перечисленные и принятые к исполнению основные положения системного подхода характеризуют лишь исходную основу метода, однако эффективность его использования полностью зависит от избираемого способа их реализации.

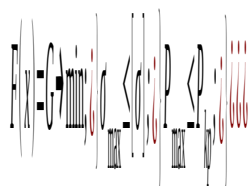
Для систематизации и обобщения сведений об основных признаках системного анализа, которые способствуют представлению разрозненных данных в упорядоченном виде с меньшим числом существенного переменных, необходимо: систематизировать взаимосвязь между системами, предназначенными для поддержания нормируемых параметров; проанализировать многочисленные исходные условия, найти форму их обобщения; пригодную для классификации определяющих условий НДС системы; выявить целесообразную классификацию конструкции или сооружения, способствующего целенаправленному выбору их конкурирующих вариантов; определить принципы декомпозиции систем, исходя из анализа их совокупности как единого целого; сформулировать исходную основу для построения математической модели конструкции или сооружения; классифицировать оптимизационные задачи, возникающие в практике исследований и проектирования.

Постановки задачи. Оптимизации и проектирования инженерных конструкций является одна из наиболее сложных и актуальных задач механики. При оптимизации конструкций за целевую функцию принимают вес конструкции, стоимость, частоту колебаний и т.д. Наиболее широко ставится задача проектирования конструкций минимального веса, которые находят широкое применение в таких отраслях народного хозяйства как строительство, ракетостроение, самолетостроение, кораблестроение и др. Решение ряд практически важных задач по расчету и оптимизации

оболочечных и пластинчатых конструкций, позволяет получить значительный народно хозяйственный эффект. Полученные результаты могут с успехом применяться при строительстве метрополитенов в сейсмически активной зоне, а также при строительстве важных наземных и подземных сооружений [2].

Весовая оптимизация инженерных конструкций типа пластин и оболочек предусматривает минимизацию веса этих конструкций при воздействии на них заданных систем внешних сил с соблюдением условий сохранения необходимой прочности, устойчивости, жесткости конструкций.

Задача в общем виде записывается так:



(1)

где G – вес конструкции; σ_{\max} – максимальные напряжения в конструкции;

$[\sigma]$ - допускаемые напряжения; P_{\max} – максимальная сжимающая сила; $P_{\text{кр}}$ – критическая сила; U_{\max} – максимальные перемещения в конструкции; $[U]$ - допускаемые перемещения.

Проверка ограничений (1) возможна лишь после решения системы дифференциальных уравнений равновесия или движения рассматриваемых конструкций с соответствующими начальными или граничными условиями. Рассмотрим более подробно методы решения прямой задачи расчета.

Известно, что уравнения равновесия, колебания и устойчивости анизотропных пластин относительно моментов соответственно имеют вид [1]:

$$\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} = q_1(x, y), \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} + h \left(\sigma_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2 \sigma_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} + m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = q_2(x, y, t). \quad (4)$$

Здесь W - прогиб пластины, M_1 , M_{12} , M_2 – изгибающие и крутящие моменты,

$m = \gamma h$, γ - вес единицы объема, g – ускорение притяжения пластины, h - толщина.

Соотношения для M_1 , M_{12} , M_2 в случаях, когда пластины являются изотропными, ортотропными и анизотропными, приведены в [1]. Подставляя в (2), (3) соотношения M_1 , M_{12} , M_2 в случае, когда пластина является изотропной, ортотропной или в других случаях анизотропии, можно получить соответствующие уравнения. Эти уравнения приведены во многих руководствах по теории упругости. Поэтому нет необходимости здесь приводить их вид.

В связи с этим для решения прямой задачи статистического расчета арок и осесимметричных конических оболочек нами применен конечно-разностный метод. Для расчета открытой цилиндрической оболочки применен метод Ритца, поскольку метод конечных разностей приводит в этом случае к слишком громоздкой системе алгебраических уравнений, что вызывает серьезные трудности, как при решении прямой задачи, так и при оптимизации открытых цилиндрических оболочек [2,3].

Функция цели:

$$F(x) = \int_{\alpha} \int_{\beta} h(\alpha, \beta) R d\alpha d\beta \quad (5)$$

Для незамкнутых оболочек типа сводов считаются заданными: а) граничные условия; б) длина перекрытия – a ; в) ширина перекрытия – b ; г) материал оболочки: E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; γ – удельный вес; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения; $[U]$ – допускаемые перемещения (если требуется выполнение ограничений по прочности и жесткости); д) система внешних нагрузок; е) другие ограничения (например: конструктивные, технологические и т.д.), если требуется их удовлетворение.

Оптимизируемыми параметрами являются параметры, определяющие закон изменения толщины оболочки, угол раствора оболочки, определяющий степень её крутизны.

Результаты и обсуждение. Приведем результаты расчета задачи оптимизации цилиндрической оболочки, прямоугольной в плане, шарнирно-опертой по всему контуру, находящейся под равномерно распределенной нормальной нагрузкой интенсивностью q . Толщина оболочки постоянная

$h = const$. Физические характеристики материала оболочки: $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кгс} / \text{см}^2$; $[\sigma] = 2000 \text{ кгс} / \text{см}^2$; $\nu = 0,5$; геометрические характеристики оболочки: $a=150$ см; $b=100$ см, нагрузка $q=1$ кг/см². Оптимизируемые

параметры h, β_0 . Ограничения на параметры: $\frac{\pi}{10} \leq \beta_0 \leq \pi$; $0,1 \text{ см} \leq h \leq 3 \text{ см}$.

Минимизируемая функция – площадь поперечного сечения

$$S = R \cdot h \cdot \beta_0$$

На конструкцию наложены ограничения:

$$\sigma_i \leq [\sigma]$$

где σ_1 - интенсивность напряжений, определяемая по формуле

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{12})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6\tau_{23}^2} \quad (6)$$

Напряжения $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \tau_{23}$ определяются после решения уравнений (6) методом Ритца. В качестве координатных функций выбираются балочные функции, которые в случае шарнирного опирания оболочки имеют вид

$$\begin{aligned} U_{n,m} &= \cos \frac{n\pi\alpha}{\alpha_0} \sin \frac{m\pi\beta}{\beta_0}; \\ V_{n,m} &= \sin \frac{n\pi\alpha}{\alpha_0} \cos \frac{m\pi\beta}{\beta_0}; \\ W_{n,m} &= \sin \frac{n\pi\alpha}{\alpha_0} \cos \frac{m\pi\beta}{\beta_0} \end{aligned} \quad (7)$$

Оптимизация проводится при помощи алгоритма ГП-3 с точностью $\varepsilon \approx 2\%$ [4]. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета оптимизации

| В лок. миним. | S, см ³ | h, см | β_0 , рад | σ_i , кг/см ² | Шаги |
|---------------|--------------------|----------|-----------------|---------------------------------|------|
| 1 | 125,0179 | 0,956369 | 2,467197 | 1990 | 52 |
| 2 | 126,6418 | 1,125607 | 1,662033 | 1977 | 28 |
| 3 | 114,072 | 0,8343 | 2,6613 | 1989 | 39 |
| 4 | 165,1633 | 1,53425 | 1,320312 | 1993 | 42 |

На рис.1, представлены кривые $\sigma_i(\alpha, \beta)$, соответствующие полученным минимумам.

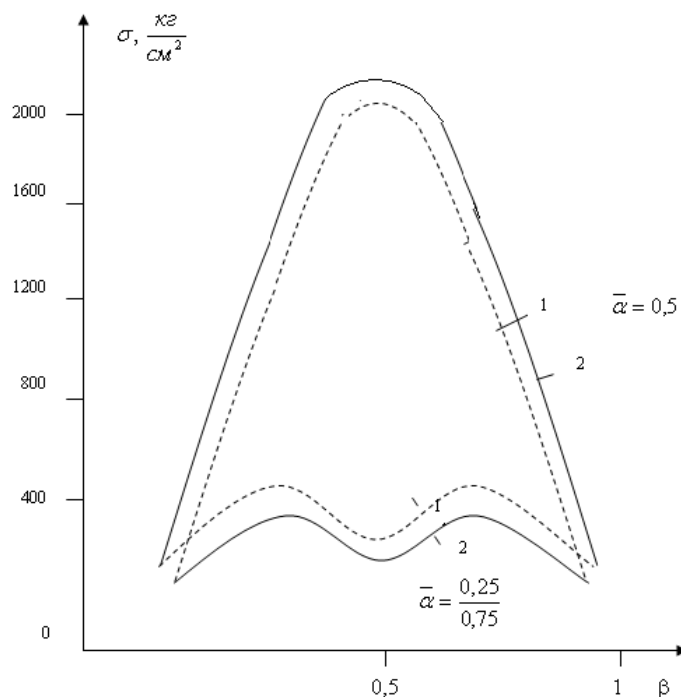


Рис. 1. Кривые $\sigma_i(\alpha, \beta)$, соответствующие полученным минимумам

По результатам решения задачи, видно, что применение цилиндрических оболочек переменной толщины позволяет снизить вес конструкции примерно на 14%, отсюда вывод о том, что имеется оптимизация веса, т.е. существенном снижении веса конструкции. Необходимость оптимизации конструкций со всей очевидностью прослеживается в результатах решения приведенных задач. В то время как во всех найденных минимумах рассматриваемые конструкции находились на границе прочности или устойчивости, значения их весов значительно отличались, обе конструкции, обладая одинаковым запасом прочности, отличаются по весу почти в 20 %. Например, применение для оболочек переменной толщины (в виде различных законов $h(\beta)$ – для цилиндрических оболочек позволило в ряде случаев снизить вес конструкции ~14% (для

цилиндрических оболочек) по сравнению с оболочками постоянной толщины, что указывает на оптимизацию - целесообразность применения переменной толщины, постановки и решения задач оптимизации при проектировании специальных оболочек минимального веса [7].

Заключение. Задачи оптимизации инженерных конструкций типа пластин и оболочек сложны. Особую трудность представляет учет ограничений вследствие их разнообразия. Здесь и простейшие ограничения на параметры, типа $Q_i \leq x_i \leq b_i$, и функциональные (по прочности, устойчивости, жесткости). Причем в большинстве случаев для вычисления одного числа G_{max} необходимо решать систему дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими граничными условиями, что представляет определенные трудности. Оптимизируемые параметры могут меняться как непрерывно, так и дискретно. Целевая функция может быть также занята в неявном виде.

При весовой оптимизации конструкций время, требуемое на проверку ограничений, в основном, на несколько порядков больше, чем на вычисление целевой функции – веса конструкции, что предопределяет необходимость дифференцированного подхода к этим вычислениям с целью максимального сокращения количества проверки ограничений при сохранении необходимой надежности и точности нахождения оптимума. Многоэкстремальность задач оптимизации конструкций, о чем заявил ряд ученых, еще раз подтверждена полученными результатами: при решении задач найдено по несколько минимумов.

Работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологии: ГНТП-17 – «Разработка современных информационных систем, интеллектуальных средств управления и обучения, научно-технических баз данных и программных продуктов, обеспечивающих

широкое развитие и внедрение информационных и телекоммуникационных технологий».

Использованное литература

1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин: Прочность, устойчивость и колебания. 2-е изд. перераб. и доп.- М.: Наука, 1987. – 360 с.
2. Кабулов В.К., Назиров Ш.А., Якубов С.Х. Алгоритмизация решения оптимизационных задач. – Ташкент: Фан, 2008. – 204 с.
3. Назиров Ш.А., Якубов С.Х. Алгоритмическая система, автоматизирующая процессы оптимизации для проектирования инженерных конструкций и сооружений //Государственное патентное ведомства РУз. Свидетельство, DGU 01422. 13.11. 2007.
4. Пискорский Л.Ф. Алгоритмы ГП2 и ГП3 поиска глобального экстремума функции многих переменных //Вопросы вычислительной и прикладной математики: Сб. науч. тр. – Ташкент, ИК АН Узбекистана, 1973. – вып.20.
5. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1978. – 410 с.
6. Якубов С.Х. Системный анализ оптимизации проектирования инженерных конструкций и сооружений //Проблемы оптимизации сложных систем: Докл. Седьмой междунар. Азиатской школы-семинара. – Ташкент, 2011. – с.154-163.
7. Якубов С.Х. Методы и алгоритмы синтеза и анализа конструкторских и технологических решений в системе автоматизированного проектирования инженерных конструкций и сооружений. - М.: ИНФРА-М, 2019.-164 с.