

УДК624.014: 693.977

## МНОГОФАКТОРНАЯ НЕЙРООПТИМИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МКЭ

(на примере стальных гофрированных балок)

*д.т.н., проф., Егоров Е.А., асп. Купневич Л.В.*

*ГВУЗ "Приднепровская академия строительства и архитектуры"*

**Постановка проблемы.** Применение нейросетевых технологий (НТ) для оптимизации строительных конструкций основано на способности нейросети эффективно обрабатывать многопараметрическую (в общем случае многофакторную) информацию и находить оптимальные пути к достижению целевой функции. Примеры решения оптимизационных задач с применением НТ освещены в [1,2].

Следует отметить, что сами по себе НТ являются сверхуниверсальным инструментом, позволяющим решать широкий круг самых разнообразных задач и проблем в различных сферах человеческой деятельности. Вместе с тем, применение НТ к решению конкретных задач требует разработки конкретной атрибутики, заключающейся в правильности смысловой постановки задачи, выбора наиболее рационального математического метода решения и его настроек – а это в случае НТ подразумевает выбор адекватной структуры нейросети, алгоритма ее обучения, критериев качества решения задачи и т.д. В итоге решение указанных вопросов предполагает разработку специальных алгоритмов реализации НТ применительно к решению конкретных задач.

**Цель, суть и актуальность исследований.** Цель исследований состояла в апробации разработанного авторами алгоритма многофакторной нейросетевой оптимизации (МФН-оптимизация) на основе метода конечных элементов.

Разработанный авторами алгоритм позволяет строить модель в форме управляющих параметров отражающих смысловую постановку задачи. Общая блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

В блоке «параметрический блок» в той или иной форме задаются исходные данные (геометрические размеры, свойства материала, нагрузки и воздействия) и целевая функция (минимизация расхода металла, стоимости и т.д.).

Блок ГНС является блоком, управляющим работой блоков «генератор конечно-элементной сетки» и «конечно-элементный процессор». Блок «генератор конечно-элементной сетки» формирует конечно-элементную модель исследуемого объекта (балки, колонны, плиты, оболочки, стального каркаса и т.д.) работа блока осуществляется на базе программы MeshGenerator.

Блок «конечно-элементный процессор» - представляет собой программу для решения уравнений МКЭ. Авторами для решения поставленной задачи применялся конечно-элементный процессор Netgen (в общем случае здесь могут использоваться известные ПВК «SCAD», «ЛИРА» и др.).

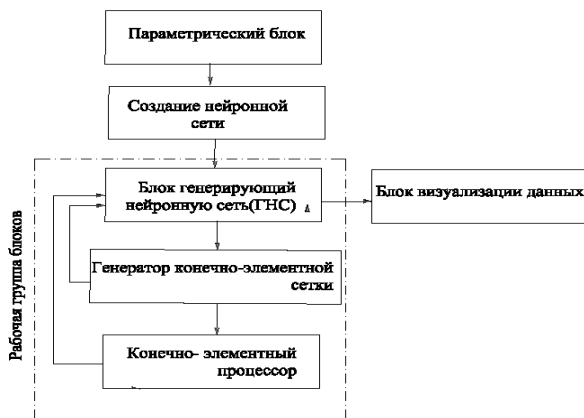


Рис.1 Общая схема работы программы для оптимизации балок

Блок «конечно-элементный процессор» - представляет собой программу для решения уравнений МКЭ. Авторами для решения поставленной задачи применялся конечно-элементный процессор Netgen (в общем случае здесь могут использоваться известные ПВК «SCAD», «ЛИРА» и др.).

Совместная работа рабочей группы блоков осуществляется в автоматическом диалоговом режиме, что и обеспечивает достижение целевой функции.

В качестве примера в статье рассматривается задача оптимизации балок с гофрированной стенкой. Гофрированные балки показали высокую эффективность при использовании их в качестве несущих металлических конструкций. В строительной практике наиболее распространены балки со стенкой, имеющей гофры преимущественно волнистого, треугольного или трапециевидного очертания с постоянными по длине шагом и высотой полуволны гофра. Вместе с тем, учитывая большие возможности современной промышленности можно говорить о производстве балок с произвольно гофрированной стенкой, Именно это обстоятельство делает задачу оптимизации данных конструктивных элементов весьма актуальной.

**Изложение результатов исследований.** В качестве объекта исследований была принята стальная шарнирно опертая балка с гофрированной стенкой пролетом 6.0 м. Балка загружалась равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью  $q=30 \text{ кН/м}$ . Материал полка - Ст3 сп5 (С255), материал стенок - Ст3 сп6 (С245). Гофрирование балок во всех случаях выполняется так, что гофры ориентированы по вертикали. Эти данные являлись в данном случае базовыми параметрами для всех

рассмотренных в статье вариантов балок. Все остальные параметры (представлены далее) в различных вариантах являлись либо фиксированными, т.е., однозначно задаваемыми, либо свободными – их определение осуществлялось оптимизационным алгоритмом, т.е., это оптимизируемые параметры. Следует уточнить лишь то, что фиксация (задание) некоторых параметров могла осуществляться либо конкретным числом, либо функцией. Во всех случаях целью оптимизации является минимум металлоемкости с выполнением ограничений на прочность, устойчивость и деформативность.

Для демонстрации работы разработанного авторами алгоритма в статье приводятся расчеты по семи вариантам балок, см. таблицу 1. Варианты I и III не рассчитывались (приняты по [3, 4]), но приводятся здесь для сравнения и оценки получаемых решений.

Табл.1

*Варианты балок с гофрированной стенкой*

№№ вариантов	Характеристика вариантов балок
I	Стальная балка с гофрированной стенкой с однозначно заданными параметрами (балка взята из сортамента стальных балок с гофрированной стенкой фирмы Zeman)
II	Такая же балка с такими же (по I варианту) однозначно заданными (фиксированными) параметрами, но рассчитанная по алгоритму МФН-оптимизация.
III	Стальная балка с гофрированной стенкой, основные параметры которой определены специальным расчетом [3], обеспечивающим минимум металлоемкости.
IV	Такая же балка с гофрированной стенкой с такими же (по варианту III) фиксированными и свободными параметрами, но рассчитанная по алгоритму МФН-оптимизация.
V	Стальная балка с гофрированной стенкой с постоянными по длине балки параметрами гофрирования (гофрирование задано в виде функции, т.е., амплитуда и шаг гофра могут быть произвольными, но постоянными по длине балки).
VI	Стальная балка с гофрированной стенкой с постоянными по длине балки параметрами гофрирования, но с произвольно задаваемым профилем полок.
VII	Стальная балка с гофрированной стенкой с произвольно задаваемыми параметрами гофрирования (шаг и амплитуда могут произвольно изменяться по длине балки) и профилем полок

В таблице 2 приводится перечень технических параметров рассмотренных гофрированных балок и характер (степень) их фиксации, а в таблице 3 результирующие значения параметров, полученных как результат расчета с использованием алгоритма МФН-оптимизация.

К результатам, приведенным в таблице 3, необходимо дать следующие пояснения:

-в расчете II варианта какая-либо оптимизация была исключена, поскольку все параметры балки задавались однозначно (являлись фиксированными), поэтому различие в металлоемкости между I и II вариантами обуславливается только точностью расчета МКЭ и в данном случае составило около 1%;

Табл.2

*Характер (степень) фиксации технических параметров в рассмотренных вариантах*

Конструктивный элемент	Параметры	№№ вариантов						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
полки	толщина	+	+	-	-	-	-	-
	ширина	+	+	-	-	-	-	-
	высота	+	+	-	-	-	-	-
	профиль	+	+	+	+	+	-	-
стенка	высота	+	+	-	-	-	-	-
	толщина	+	+	-	-	-	-	-
	конфигурация волны	+	+	+	+	-	-	-
	направление гофра	+	+	+	+	+	+	+
	шаг гофрирования задан числом	+	+	-	-	-	-	-
	шаг гофрирования задан функцией	+	+	+	+	+	+	-
	амплитуда гофрирования задана числом	+	+	-	-	-	-	-
	амплитуда гофрирования задана функцией	+	+	+	+	+	+	-

Примечание: индексом «+» отмечены фиксированные параметры (задаются, например, из условий изготовления, монтажа и т.п.). Индексом «-» отмечены параметры, определяемые в процессе решения оптимизационной задачи.

-различия между вариантами III, IV обусловлены тем, что в [3] расчет гофрированной балки проводился с принятием упрощающих коэффициентов, а здесь осуществлялся посредством МКЭ, состав фиксированных и свободных

параметров указанных вариантах был абсолютно идентичным, поэтому в итоге и здесь различие оказалось весьма незначительным (2-2,5%);

-при расчете вариантов V, VI и VII количество свободных (произвольно задаваемых) параметров все более возрастало, т.е., возможности оптимизации все более увеличивались, поэтому и различия в металлоемкости рассматриваемых балок все более возрастали и составили (вариант VII) 24% в сравнении с вариантом I (все параметры фиксированные) и 17% с вариантом III (оптимизация с использованием аналитических инженерных методов).

Табл.3

*Результатирующие значения параметров рассмотренных вариантов*

№№, варианты	$b_f$ см	$t_f$ см	$t_w$ см	$a$ см	$f$ см	$h$ см	Масса балки, кг
I	20	1	0,25	5	2,5	50	259,2
II	20	1	0,25	5	2,5	50	256,8
III	18	1	0,2	4,5	2,3	44,5	236,4
IV	17,5	1	0,19	4,5	2,3	44	231,1
V	17	0,9	0,18	4,2	2,5	44	214,9
VI	100x45x5		0,18	4	2,7	42,8	210,3
VII	100x45x5		0,16	Переменные по длине балки		40,4	196,7

Интересно обратить внимание на то, что в вариантах 1-6 параметры гофрирования (амплитуда и шаг гофра) задавались постоянными по всей длине балки, в варианте 7 указанные ограничения были сняты. В вариантах 1-5 профиль полки был зафиксирован в виде плоского листа (см. рис.2), а в вариантах 6-7 указанное ограничение было снято и в итоге в результате оптимизации был получен профиль в виде прямоугольной трубы, см. рис. 2.

**Выводы.** Рассмотренные в статье балки с гофрированной стенкой являются сплошностенчатыми конструкциями с весьма непростым характером напряженно-деформированного состояния. Несмотря на это, все результаты расчета находятся, во-первых, в хорошем соответствии с эталонными вариантами (в данном случае варианты I, III), во-вторых, физически правильно реагируют на те или иные изменения условий

оптимизации. Все это позволяет считать их достоверными и сделать следующие выводы:

1. Разработанный авторами алгоритм МФН-оптимизации позволяет эффективно решать многофакторные задачи оптимизации строительных конструкций.

2. Применение МФН-оптимизации для проектирования стальных балок с гофрированной стенкой позволяет получить оптимальные решения не только за счет нахождения более эффективных (оптимальных) параметров гофрирования, но и за счет качественного изменения всего профиля балок.

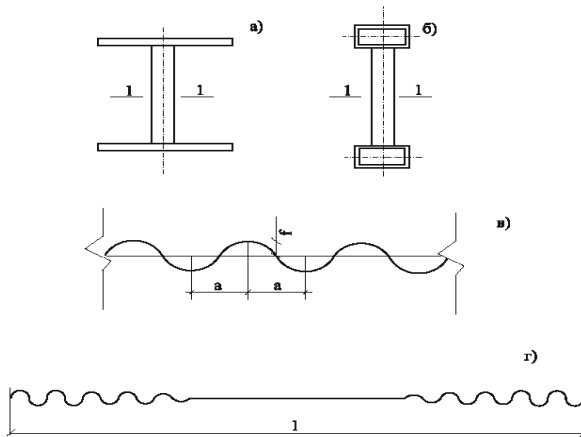


Рис.2 а- сечение балки по вариантам I–V; б- сечение балки по вариантам VI–VII; в- гофрирование стенки по вариантам I–VI; г- гофрирование стенки по варианту VII.

### ИСПОЛЬЗОВАНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Абовский, Н. П. Нейросетевые технологии в задачах оптимизации, прогнозирования и управления: науч. издание / Н. П. Абовский, А. П. Деруга, О. М. Максимова, П. А. Светашков, Н. И. Марчук. – Красноярск :КрасГАСА, 2003. – 176 с.
2. Zhang Y., Wang J. Recurrent neural networks for nonlinear output optimization // Automatica.–2001. – Vol. 37, N 8. – P. 1161 – 1173.
3. Барановская, С.Г. Прочность и устойчивость гофрированной стенки стальной двутавровой балки Текст.: автореф. дис. канд. тех. наук : 05.23.01 / С.Г. Барановская. Новосибирск, 1990.-21 с.
4. Corrugated web beam. Technical documentation. Zeman & Co.