

УДК 621:66.046.8

А.А. Кожухарь, магистр,  
П.А. Белоус, канд. техн. наук, доц.,  
В.А. Белоус, канд. техн. наук,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСОВ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АВТОКЛАВОВ

*А.А. Кожухарь, П.О. Білоус, В.О. Білоус.* **Параметрична оптимізація конструкцій корпусів горизонтальних автоклавів.** Завдання параметричної оптимізації конструкцій корпусів горизонтальних автоклавів вирішується на основі методу спрямованого сканування простору проектування з використанням рівномірно розподіленої послідовності пробних точок. Для ефективного застосування цього методу пропонується побудова поверхонь функціональних обмежень для еквівалентних напружень і прогинів. Оптимізація конструктивних параметрів базової конструкції корпуса дозволяє істотно знизити його матеріалоемність.

*А.А. Кожухарь, П.А. Белоус, В.А. Белоус.* **Параметрическая оптимизация конструкций корпусов горизонтальных автоклавов.** Задача параметрической оптимизации конструкций корпусов горизонтальных автоклавов решается на основе метода направленного сканирования пространства проектирования с использованием равномерно распределенной последовательности пробных точек. Для эффективного применения этого метода предлагается построение поверхностей функциональных ограничений для эквивалентных напряжений и прогибов. Оптимизация конструктивных параметров базовой конструкции корпуса позволяет существенно снижать его материалоемкость.

*A.A. Kozhukhar, P.A. Belous, V.A. Belous.* **The parameters optimization of bodies' designs of horizontal autoclaves.** The problem of the parameters optimization of bodies' designs of horizontal autoclaves is solved on the basis of the method of direct scanning of the design space with the use of the uniform distribution of test points. For effective application of this method the construction of functional limitation surfaces for equivalent stresses and bending is suggested. The optimization of constructive parameters of bodies' base design allows its specific consumption of materials to be considerably reduced.

При проектировании машин основной задачей является выбор конструктивных параметров, обеспечивающих их работоспособность с учетом различных требований. Применительно к деформируемым механическим конструкциям таковыми являются условия прочности и жесткости при ограничениях на их размеры, массу и др. Решение, которое удовлетворяет всем заданным требованиям, считается допустимым.

Наряду с проблемой повышения несущей способности и остаточного ресурса машин особое значение приобретают вопросы, связанные с решением задач их оптимального проектирования по массе. Они могут быть рассмотрены на основе системного исследования характерных особенностей работы машин методами численного эксперимента. При этом можно применять методологию параметрической оптимизации упругих систем [1].

Целевая функция считается функцией параметров состояния проектируемой машины, которые разделяются на неуправляемые (неизменяемые в процессе оптимизации), представляемые в виде вектора  $C(c_1, \dots, c_p)$ , и управляемые (изменяемые в процессе оптимизации), представляемые в виде вектора  $X(x_1, \dots, x_n)$ . В зависимости от различной постановки оптимизационной задачи применительно к выбранной расчетной схеме соотношение числа управляемых  $n$  и неуправляемых  $p$  параметров может изменяться, но их сумма  $(n+p)$  является величиной постоянной. Множество всех возможных (допустимых и недопустимых) проектных решений определяет в ортогональной системе координат пространство проектирования, размерность которого размерности вектора управляемых параметров  $X(x_1, \dots, x_n)$ .

На управляемые параметры накладываются прямые ограничения

$$a_j \leq x_j \leq b_j \quad (j = 1, \dots, n).$$

Они связаны, как правило, с условиями производства проектируемых машин. Множество  $X(x_1, \dots, x_n)$  точек пространства проектирования, удовлетворяющих прямым ограничениям на управляемые параметры, определяет область поиска  $\Pi$  оптимальных решений в виде  $n$ -мерного параллелепипеда.

Кроме прямых ограничений обычно присутствует определенное число  $s$  функциональных ограничений, которые можно представить в виде

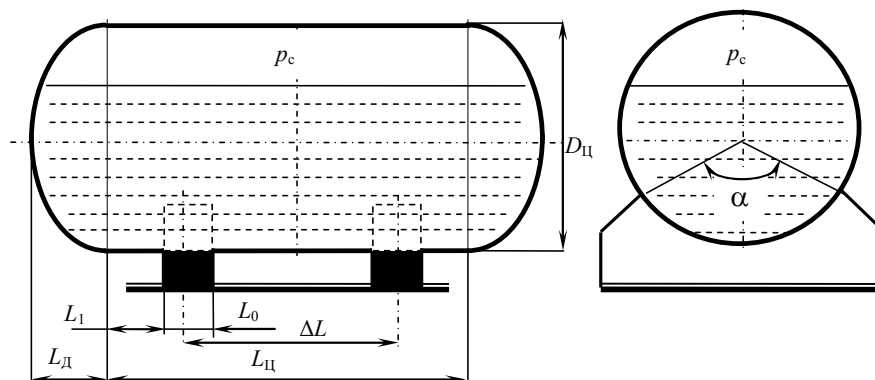
$$F_k(X) \leq 0 \quad (k = 1, \dots, s).$$

Эти ограничения связаны с условиями работоспособности машин, которые, в свою очередь, в виде равенств определяют в ортогональной системе координат поверхности функциональных ограничений в пространстве проектирования. Область допустимых решений  $D$  определяется множеством проектных решений, удовлетворяющих всем принятым ограничениям.

Общая постановка оптимизационной параметрической задачи состоит в следующем: требуется найти множество управляемых параметров, определяющих точку оптимума  $X^*(x_1^*, \dots, x_n^*)$  в области допустимых решений  $D$ , заданной прямыми и функциональными ограничениями, и оптимальное значение целевой функции  $M(X)$  в точке  $X^*(x_1^*, \dots, x_n^*)$ , т.е.  $M(X^*)$ . Точка  $X^*$  может быть как внутренней, так и внешней точкой области  $D$ . При этом оптимальное решение должно удовлетворять условию

$$M(X^*) = M^* = \underset{X \in D}{\text{opt}} M(X).$$

В качестве оптимизируемого элемента конструкции машины рассматривался корпус экспериментального автоклава горизонтального типа, который применяется в строительной индустрии, где подобные аппараты используются при изготовлении силикатного кирпича. Корпус, установленный на двух седловых опорах (ложементах), состоит из цилиндрической части с эллиптическими днищами и находится под действием содержащейся в нем жидкости, внутренне-го избыточного давления  $p_c$  и собственного веса (см. рисунок).



Конструкция корпуса автоклава горизонтального типа

Параметры конструкции корпуса автоклава: диаметр цилиндрической части  $D_{\text{ц}} = 1200$  мм; длина цилиндрической части  $L_{\text{ц}} = 1200$  мм; толщина стенки цилиндрической части  $h_{\text{ц}} = 10$  мм; высота эллиптического днища  $L_{\text{д}} = 300$  мм; толщина стенки эллиптического днища  $h_{\text{д}} = 10$  мм; расстояние от днища до ложемента  $L_1 = 100$  мм; ширина ложемента  $L_0 = 100$  мм; расстояние между ложементами  $\Delta L = 900$  мм; угол охвата корпуса ложементом  $\alpha = 120^\circ$ .

Степень заполнения жидкостью  $K_{\text{ж}} = 0,85$ ; плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}} = 1,66 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>; плотность конструкционного материала корпуса  $\rho_{\text{м}} = 2,7 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>, его модуль упругости  $E = 1 \cdot 10^5$  МПа; давление в сосуде  $p_c = 0,13$  МПа.

Были зафиксированы неуправляемые параметры: относительная высота эллиптического днища  $c_1 = L_{\text{д}} / D_{\text{ц}} = 0,25$ ; его относительная толщина  $c_2 = h_{\text{д}} / h_{\text{ц}} = 1$ ; ширина ложементов  $c_3 = L_0 = 100$  мм.

Использовались следующие управляемые параметры: относительная длина цилиндрической части  $x_1 = L_{\text{ц}} / D_{\text{ц}}$ ; ее относительная толщина  $x_2 = 100 h_{\text{ц}} / D_{\text{ц}}$ ; относительное расстояние между ложементами  $x_3 = \Delta L / L_{\text{ц}}$ ; относительный угол охвата корпуса ложементом  $x_4 = \alpha / 180$ .

Тогда объем внутренней полости корпуса автоклава

$$V_c = \frac{\pi D_{\text{ц}}^2 L_{\text{ц}}}{4} \left( 1 + \frac{4 L_{\text{д}}}{3 L_{\text{ц}}} \right) = \frac{(3x_1 + 1)\pi D_{\text{ц}}^3}{12},$$

а площадь его поверхности

$$S_c = \pi D_{\text{ц}} L_{\text{ц}} + \pi D_{\text{ц}}^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{4c_1^2}{\sqrt{1-4c_1^2}} \ln \frac{1 + \sqrt{1-4c_1^2}}{1 - \sqrt{1-4c_1^2}} \right) = \pi D_{\text{ц}}^2 (x_1 + 0,69).$$

На числовые значения этих параметров были наложены прямые ограничения, обусловленные требованиями технологического процесса изготовления автоклавов подобных типоразмеров:  $0,6 \leq x_1 \leq 1,6$ ;  $0,6 \leq x_2 \leq 1,4$ ;  $0,5 \leq x_3 \leq 0,9$ ;  $0,44 \leq x_4 \leq 0,88$ .

Кроме того, должны выполняться также функциональные ограничения, связанные с условиями работоспособности корпуса: условие прочности по эквивалентному напряжению  $\sigma$  в точках наружной его поверхности в зоне, непосредственно прилегающей к ложементу,

$$\sigma_{\text{max}} \leq [\sigma] = 13,3 \text{ МПа}$$

и условие жесткости по прогибу в среднем поперечном сечении

$$w_{\text{max}} \leq [w] = 0,2 \text{ мм},$$

где  $[\sigma]$  — допускаемое эквивалентное напряжение;

$[w]$  — допускаемая стрела прогиба.

Базовые значения управляемых параметров

$$x_1^0 = 1; x_2^0 = 0,833; x_3^0 = 0,75; x_4^0 = 0,67.$$

Масса соответствующей базовой конструкции корпуса  $M^0 = 206,5$  кг.

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) корпуса автоклава осуществлялось методом численного эксперимента (расчета) с помощью комплекса ANSYS/Structural, реализующего метод конечных элементов, что позволило достаточно полно учесть все конструктивные особенности корпуса, а также рассчитать его НДС с учетом совместного деформирования оболочки и опор. Анализ результатов этого численного исследования показывает, что уровень напряжений  $\sigma_{\text{max}}$  зависит от конструктивных параметров в различной степени. Наиболее сильно выражена зависимость от относительной толщины  $x_2$ ; в меньшей степени, но достаточно заметно, — от относительной длины корпуса  $x_1$  и относительного расстояния между ложементами  $x_3$ ; незначительно — от относительного угла охвата ложементом  $x_4$ . Прогиб  $w_{\text{max}}$  существенно зависит от всех параметров, но в наибольшей степени от относительной толщины  $x_2$ .

Была поставлена задача создания цилиндрического корпуса автоклава, имеющего минимальную массу  $M^*$  при заданном его объеме  $V_c = 1,81 \text{ м}^3$ . При этом на этапе оптимального проектирования требовалось: найти множество управляемых параметров, определяющих точку оптимума  $X^*(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$  в области допустимых решений  $D$ , заданной системой прямых и функциональных ограничений целевой функции  $M(X)$ , значение которой вычисляется по формуле

$$M(X) = 7,67V_c^{2/3} \frac{\rho_M x_2 (x_1 + 0,69)}{(3x_1 + 1)^{2/3}},$$

и, далее, оптимальное значение этой функции  $M(X)$  в точке  $X^*$ , т.е.  $M(X^*)$ .

При изменениях каждого из выбранных управляемых параметров  $x_j$  при фиксированных базовых значениях остальных трех  $x_i = x_i^0$  ( $i \neq j$ ) полученные зависимости были представлены приближенными формулами в виде полиномов Лагранжа пятой степени

$$\frac{\sigma_{j\max}}{[\sigma]} = c_0 + \sum_{m=1}^5 c_{mj} (x_j - x_{0j})^m; \quad c_0 = \frac{\sigma_{0\max}}{[\sigma]};$$

$$\frac{w_{j\max}}{[w]} = d_0 + \sum_{m=1}^5 d_{mj} (x_j - x_{0j})^m; \quad d_0 = \frac{w_{0\max}}{[w]} \quad (j = 1, \dots, 4),$$

где  $\sigma_{0\max}$  — максимальное эквивалентное напряжение для базовой конструкции;

$w_{0\max}$  — максимальный прогиб для базовой конструкции.

Такие зависимости представляют собой уравнения параметрических кривых, образующих систему ортогональных криволинейных координат. При этом параметрическая кривая будет линией главной кривизны на поверхностях функциональных ограничений для эквивалентных напряжений и прогибов в пространстве проектирования в виде четырехмерного параллелепипеда. Тогда уравнения таких поверхностей можно представить в следующем виде:

$$\frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]} = c_0 + \sum_{j=1}^4 \sum_{m=1}^5 c_{mj} (x_j - x_{0j})^m \quad \text{при ограничении} \quad \frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]} \leq 1;$$

$$\frac{w_{\max}}{[w]} = d_0 + \sum_{m,j=1}^4 d_{mj} (x_j - x_{0j})^m \quad \text{при ограничении} \quad \frac{w_{\max}}{[w]} \leq 1.$$

Для прямого решения задач оптимизации с учетом ограничений можно применять метод ненаправленного сканирования. Он сводится к полному перебору всех возможных сочетаний управляемых параметров, задаваемых узлами пространственной детерминированной сетки. Несмотря на простоту поисковой процедуры, этот метод крайне неэффективен из-за громадного количества пробных точек.

Задача параметрической оптимизации конструкций корпусов автоклавов решена на основе метода направленного сканирования пространства проектирования с использованием равномерно распределенной последовательности (РПП) пробных точек. Среди известных РПП наилучшими характеристиками равномерности обладают ЛПП — последовательности  $Q_0, Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_N$ , где  $N$  — число пробных точек [2].

Ортогональные координаты четырехмерной пробной точки  $X_i(x_{i1}, \dots, x_{i4})$  вычислялись по ортогональным координатам четырехмерной точки  $Q_i(q_{i1}, \dots, q_{i4})$ :  $x_{i1} = 0,6 + (1,6 - 0,6)q_{i1}$ ,  $x_{i2} = 0,6 + (1,4 - 0,6)q_{i2}$ ,  $x_{i3} = 0,5 + (0,9 - 0,5)q_{i3}$ ,  $x_{i4} = 0,44 + (0,88 - 0,44)q_{i4}$ .

Рассматривалось число пробных точек  $N = 2^{10} = 2048$ . Очевидно, что проведение такого числа расчетов даже с помощью комплекса ANSYS весьма затруднительно. В этой связи использование поверхностей функциональных ограничений для эквивалентных напряжений и прогибов, построенных с помощью результатов только 20 расчетов, позволило довольно эффективно применить метод направленного сканирования пространства проектирования. Найденные оптимизированные параметры

$$x_1^* = 0,70; \quad x_2^* = 0,66; \quad x_3^* = 0,65; \quad x_4^* = 0,78.$$

Им соответствуют такие характеристики оптимальной конструкции:  $D_{\Pi}^* = 1305$  мм;  $L_{\Pi}^* = 915$  мм;  $h_{\Pi}^* = 8$  мм;  $L_{\Delta}^* = 325$  мм;  $h_{\Delta}^* = 8$  мм;  $L_1^* = 110$  мм;  $L_0 = 100$  мм;  $\Delta L^* = 595$  мм;  $\alpha^* = 140^0$ . Масса соответствующей конструкции  $M^* = 161,0$  кг.

---

Очевидно, что полученное снижение материалоемкости

$$\Delta M = \frac{M^0 - M^*}{M^0} \cdot 100\% = 22\%$$

свидетельствует об эффективности предлагаемого метода оптимизации существующих конструкций корпусов горизонтальных автоклавов при действии на них рассмотренной комбинации внешних нагрузок.

### Литература

1. Малков, В.П. Оптимизация упругих систем / В.П. Малков, А.Г. Угодчиков. — М.: Наука, 1981. — 288 с.
2. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. — М.: Наука, 1981. — 110 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Гробей В.Ф.

Поступила в редакцию 31 октября 2008 г.

---