

DISEÑO DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS PRINCIPALES DE LOS APARATOS QUÍMICOS SOMETIDOS A PRESIÓN INTERIOR

M.Sc. Abel Goya Valdivia
Ing. Vladimir Ibarra Hernández
M.Sc. Rosendo Moreno Rodríguez*

Las metodologías que se proponen permiten de forma sencilla, rápida y eficiente resolver cualquier diseño de virolas, fondos y tapas sometidos a presión interior.

Se ha realizado un estudio de las normas [4] y [5], así como de la bibliografía especializada a nuestra disposición.

INTRODUCCIÓN

La finalidad principal del diseño consiste en elaborar los documentos necesarios para construir un objeto industrial con base en el cual se va a fabricar la producción requerida para la economía nacional de una determinada calidad en un volumen dado y dentro de los plazos establecidos con las mejores características técnicas y económicas. Para cumplir con este objetivo es necesario el concurso de muchos especialistas; el papel rector pertenece al ingeniero químico y al ingeniero mecánico. La elección del tipo y la construcción racional del aparato, la determinación de sus parámetros de servicio, las dimensiones principales, de los materiales de construcción y otros datos necesarios para

construir y calcular su resistencia lo hace el ingeniero químico a base del proceso de producción elegido, del cálculo químico - tecnológico y de las particularidades del medio que se labra. A estos problemas se dedican muchas obras científico - técnicas especiales. El ingeniero mecánico elige el equipo estándar y elabora el equipo no estándar. En el proceso de elaboración (diseño) de los aparatos no estándar, el especialista debe tomar como base los documentos técnicos normativos, de los cuales existen muchos en todo el mundo, como por ejemplo; el código ASME, las normas GOST, etc. No obstante, la existencia de estos documentos, en la práctica, para nuestros especialistas, los procesos de diseño mecánico se hacen muy complejos, por diferentes razones, como son:

* Centro de Estudio de Sustancias Especiales. Centro de Estudios de Informática. Universidad Central de Las Villas, Cuba.

- Cuba no tiene establecida una norma particular, por lo que utiliza diferentes tipos de normas, según la rama de la economía, niveles de acceso y adquisición, e incluso preferencias de algunos diseñadores, con la consecuencia negativa de que cada norma le da un enfoque particular al problema, en dependencia de su procedencia las exigencias para el diseño son muy variadas.
- La bibliografía especializada, existente en el país, no hace un análisis profundo de los fundamentos teóricos del diseño mecánico de aparatos químicos, ni plantea métodos de cálculo que sirvan de guía para el diseño.

Teniendo en cuenta toda la problemática anterior, y como parte modesta del esfuerzo para darle solución, se consideró necesario desarrollar estas metodologías de cálculo.

GENERALIDADES DEL DISEÑO DE APARATOS QUÍMICOS

Es conveniente comenzar el diseño por elegir el material principal de construcción que corresponde a las principales condiciones del proceso tecnológico que se caracteriza por el medio, la presión y la temperatura, una vez elegido el material de construcción, se compone el esquema de cálculo del elemento en cuestión, se determinan las dimensiones exteriores principales y se efectúa el cálculo según los criterios principales de capacidad de funcionamiento. Es necesario efectuar los cálculos partiendo de las condiciones más desfavorables posibles en el empleo (durante el funcionamiento, puesta en marcha, parada, distintas pruebas, etc.).

Los Parámetros de cálculo Principales que se utilizan para elegir el material de construcción y realizar los cálculos de resistencia de los elementos de un aparato químico son:

1. Temperatura de cálculo ($t_{cal.}$).

$$t_{cal.} = \max(30^{\circ} C; t_m)$$

Se determina a partir de la temperatura de servicio (temperatura del medio en el cual funciona el aparato (t_m)) según la siguiente fórmula :

2. Presión de cálculo ($P_{cal.}$).

Se determina a partir de la presión de servicio (excesiva interior o exterior (P)) que surge en el proceso de trabajo y de la presión hidrostática (P_h) del medio en el cual funciona el aparato, según la siguiente fórmula:

$$P_{cal.} = P + P_h$$

donde debe cumplirse que $(P_h / P) * 100 > 5\%$.

3. Tensiones admisibles ($[\Gamma]$).

Se determina, a partir de las tensiones admisibles normadas (Γ^*) del material de construcción del aparato que surgen en el proceso de trabajo y de prueba, y se afecta por el coeficiente de corrección (η), que tiene en cuenta la forma de la pieza bruta, según la siguiente fórmula:

$$[\Gamma] = \eta \cdot \Gamma^*$$

donde h es:

- 1 para planchas laminadas,
- 0.8 para piezas fundidas con control, y
- 0.7 para piezas fundidas sin control.

4. Espesor ejecutivo (S).

Se determina a partir de:

- El espesor de cálculo (depende del elemento en cuestión y de la carga a que esté sometido ($S_{cal.}$)).
- El sobreespesor (C).

$$S = S_{cal} + C$$

donde:

$C = C_1 + C_2 + C_3$, C_1 es la adición al espesor para compensar la pérdida de material producto de la corrosión y la erosión. Se calcula como:

$$C_1 = \begin{cases} (p_c + p_e) \cdot \tau \\ 2mm \end{cases}$$

donde:

p_c , es la velocidad de corrosión del material de construcción por la sustancia de trabajo,

p_e , es la velocidad de erosión del material de construcción por la sustancia de trabajo,

τ , es el tiempo de servicio.

C_2 , es la adición al espesor para compensar la tolerancia negativa, y

C_3 , es la adición al espesor para compensar las pérdidas por dificultades tecnológicas.

5. Módulo de elasticidad longitudinal (E).

Está en función del tipo de material y de la temperatura de cálculo. Su valor está normalizado.

6. Coeficiente de resistencia de las uniones soldadas (j).

Caracteriza la resistencia de la unión en comparación con la resistencia del material base, sus valores normados se ofrecen en función de la estructura de la costura y del procedimiento de soldadura.

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERIOR

El conjunto de los elementos constructivos principales comunes a presión interior está compuesto por tres tipos de elementos:

I. Virola

- Cilíndrica.
- Vertical.

· Horizontal.

- Esférica.
- De sección rectangular.

II. Fondo

- Cónico
- Cónico rebordeado
- Elíptico rebordeado
- Circular plano
- Circular plano rebordeado
- Semi-esférico
- Semi-esférico rebordeado
- Casquete esférico
- Rectangular plano.

III. Tapa

- Cónica
- Cónica rebordeada
- Elíptica rebordeada
- Circular plana
- Circular plana rebordeada
- Semi-esférica
- Semi-esférica rebordeada
- Casquete esférico
- Rectangular plana.

METODOLOGÍA:

1. Selección del material.
Generalmente se selecciona un material común a todos los elementos principales de un aparato o en base a un mismo criterio.
2. Esquema de cálculo.
Depende de cada tipo de elemento principal y de las cargas que sobre él actúan.
3. Cálculo de los parámetros principales y las cargas actuantes y admisibles, según los criterios principales de capacidad de funcionamiento.
 - a) Temperatura de cálculo.

Se mantiene la misma fórmula para todos los elementos principales, según la definición en los parámetros de cálculo.

b) Tensiones admisibles.

- Para condiciones de trabajo ($[\Gamma]$).

$$[\Gamma] = \eta \cdot \Gamma^*$$

- Para condiciones de prueba ($[\Gamma]_{pr.}$).

$$[\Gamma]_{pr.} = \frac{\Gamma_{fl.}}{\eta_{fl.}}$$

donde,

$\Gamma_{fl.}$, es la tensión de fluencia del material a 30 0C y

$\eta_{fl.}$, es el coeficiente de margen de seguridad para el límite de fluidez.

c) Presión de cálculo. (según quedó definido en los parámetros de cálculo).

Para el caso de la virola de sección rectangular a presión de la columna líquida se redefine la fórmula.

d) Presión de prueba.

- se determina utilizando las ecuaciones de la siguiente tabla.

Recipientes	Presión de trabajo (P) MPa.	Presión de prueba (P _{pr.}) MPa.
Todos, excepto los fundidos	> 0.5	$máx\{1.5P_{cal.}[\Gamma]_{30} / [\Gamma]; 0.2\}$
	≤ 0.5	$máx\{1.25P_{cal.}[\Gamma]_{30} / [\Gamma]; P + 0.3\}$
Fundidos	Independiente de la Presión	$máx\{1.5P_{cal.}[\Gamma]_{30} / [\Gamma]; 0.3\}$

Para el caso de la virola de sección rectangular a presión de la columna líquida se redefine la fórmula.

Los pasos e), f), g) y h) se definen en las metodologías de cada elemento.

i) Comprobación de la aplicabilidad de las ecuaciones del método de diseño.

$$\frac{S - C}{D} \leq a$$

donde a es igual a 0.1 para aceros y aleaciones base aluminio y cobre y 0.25 para aleaciones base titanio. En el caso de los fondos cónicos se debe definir de nuevo esta ecuación.

A todos los elementos mencionados se les aplica el método anterior. Seguidamente se le dará continuidad a la metodología, desarrollando las ecuaciones para el cálculo del espesor y las cargas

actuantes y admisibles, considerando las particularidades.

METODOLOGÍAS DE DISEÑO PARA VIROLAS A PRESIÓN INTERIOR

A) Metodología de diseño de las virolas cilíndricas a presión interior (verticales y horizontal).

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = máx. \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{cal.} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] - P_{cal.}} \\ \frac{P_{pr.} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} - P_{pr.}} \end{array} \right.$$

f) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$).

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

g) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{D + S - C}$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr.} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} \cdot (S - C)}{D + S - C}$$

En el diseño de las virolas cilíndricas horizontales a presión de la columna líquida, además de lo anterior se redefine el paso f) y se adiciona el h).

f) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$).

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

- Momento flexor actuante ($M_{máx.}$).

$$M_{máx.} = \frac{W \cdot l^2}{8}$$

donde:

$W = \frac{G}{l}$, es la carga distribuida,

$G = m \cdot g \cdot 10^{-6}$, es el peso total del aparato,

m , es la masa del aparato lleno,

$g = 9.81 \text{ m/seg.}^2$, es la aceleración de la gravedad y

l , es la distancia entre apoyos.

- Tensión máxima actuante ($G_{máx.}$).

$$\Gamma_{máx} = \frac{M_{máx.}}{w}$$

donde:

$$w = \frac{\pi(D_e^4 - D^4)}{32 \cdot D_e} \quad \text{es el módulo de la sección}$$

$D_e = D + 2 \cdot S$, es el diámetro exterior del aparato.

g) Verificación de la condición de resistencia.

$$[\Gamma] \geq 2 \cdot \Gamma_{máx.}$$

si no se cumple esta condición hay que aumentar el espesor o aumentar el número de apoyos para disminuir la distancia entre ellos.

B) Metodología de diseño para virola esférica a presión interior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{cal.} \cdot D}{4 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] - P_{cal.}} \\ \frac{P_{pr.} \cdot D}{4 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} - P_{pr.}} \end{array} \right.$$

f) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$).

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

g) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \frac{4 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{D + S - C}$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr.} = \frac{4 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} \cdot (S - C)}{D + S - C}$$

C) Metodología de diseño para virola de sección rectangular a presión interior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} a \sqrt{\frac{k \cdot P_{cal.}}{[\Gamma] \cdot \varphi}} \\ a \sqrt{\frac{k \cdot P_{pr.}}{[\Gamma]_{pr.} \cdot \varphi}} \end{array} \right.$$

donde,
$$k = \frac{0,75}{1 + \frac{161 \cdot a^2}{b}}$$

a lado menor del tanque,
 b lado mayor del tanque.

f) Cargas actuantes.

- Presión actuante - ($P_{cal.}$).

- Tensión máxima actuante ($\Gamma_{máx}$)

$$\Gamma_{máx.} = k \cdot P_{cal.} \left(\frac{a}{S} \right)^2$$

h) Verificación de la condición de resistencia.

$$[\Gamma] \geq \Gamma_{máx.}$$

si no se cumple esta condición se va aumentando el espesor, por los valores normados, hasta cumplir la condición, es aconsejable que el valor máximo de espesor sea $S=8$ mm, por lo que una vez alcanzado este valor, si aún no se cumple la condición, entonces se deben ir colocando refuerzos a la pared de la virola, de espesor $S = 8$ mm, hasta que se cumpla la condición, considerando a como el lado menor entre los refuerzos y b como

el lado mayor entre los refuerzos. La separación mínima entre los refuerzos debe ser 800 mm.

Para el caso que la virola esté a presión de la columna líquida se redefinen los pasos siguientes:

c) Presión de cálculo.
$$P_{cal.} = \frac{Ph}{2}$$

d) Presión de Prueba.
$$P_{pr.} = Ph_{H_2O}$$

El resto de los pasos se corresponde con el método anterior.

METODOLOGÍAS DE DISEÑO PARA FONDOS A PRESIÓN INTERIOR

A) Metodología de diseño para fondo cónico a presión interior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{cal.} \cdot D}{(2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] - P_{cal.}) \cdot \cos \alpha} \\ \frac{P_{pr.} \cdot D}{(2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} - P_{pr.}) \cdot \cos \alpha} \end{array} \right.$$

f) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$).

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

g) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] \cdot (S - C) \cdot \cos \alpha}{D + (S - C) \cdot \cos \alpha}$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr.} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} \cdot (S - C) \cdot \cos \alpha}{D + (S - C) \cdot \cos \alpha}$$

i) Comprobación de la aplicabilidad de las ecuaciones del método de diseño.

$$\frac{S - C}{D} \leq \frac{a}{\cos \alpha}$$

donde a es igual a 0.1 para aceros y aleaciones base aluminio y cobre y 0.25 para aleaciones base titanio.

Para el caso de que este fondo sea rebordado se toma:

La altura del reborde: $h = 4 \cdot S$

El radio del reborde: $r = 0,1 \cdot D$

B) Metodología de diseño para fondo elíptico rebordado a presión interior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \max. \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{cal.} \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] - 0,5 \cdot P_{cal.}} \\ \frac{P_{pr.} \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} - 0,5 \cdot P_{pr.}} \end{array} \right.$$

donde,

$R = D$, Radio de curvatura en el vértice del fondo.

$H_f = 0,25 \cdot D$, Altura del fondo.(m).

La altura del reborde: $h = 3,5 \cdot S$

El radio del reborde: $r = 0,1 \cdot D$

Si $h > 0,8 \cdot \sqrt{D \cdot (S - C)}$ el espesor del fondo no a de ser menor que el de su virola asociada.

e) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$).

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

f) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{R + 0,5 \cdot (S - C)}$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr.} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} \cdot (S - C)}{R + 0,5 \cdot (S - C)}$$

C) Metodología de diseño para fondo semiesférico a presión interior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \max. \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{cal.} \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] - 0,5 \cdot P_{cal.}} \\ \frac{P_{pr.} \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} - 0,5 \cdot P_{pr.}} \end{array} \right.$$

donde,

$R = 0,5 \cdot D$, Radio de curvatura en el vértice del fondo.

$H_f = 0,5 \cdot D$, Altura del fondo.(m).

Para el caso de que este fondo sea rebordado se toma:

La altura del reborde: $h = 4 \cdot S$

Si $h > 0,3 \cdot \sqrt{D \cdot (S - C)}$ el espesor del fondo no debe ser menor que el de su virola asociada.

e) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$)

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

f) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{R + 0,5 \cdot (S - C)}$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr.} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} \cdot (S - C)}{R + 0,5 \cdot (S - C)}$$

D) Metodología de diseño para fondo circular plano a presión interior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \begin{cases} k \cdot K_{deb.} \cdot D_{cal.} \cdot \sqrt{\frac{P_{cal.}}{\varphi \cdot [\Gamma]}} \\ k \cdot K_{deb.} \cdot D_{cal.} \cdot \sqrt{\frac{P_{pr.}}{\varphi \cdot [\Gamma]_{pr.}}} \end{cases}$$

donde,

$D_{cal.}$ y k están en dependencia de la solución constructiva del conjunto fondo-virola.

$K_{deb.}$ - Depende del número de orificios que presente el fondo, según la siguiente tabla:

Número de orificios	Fórmula
0	$K_{deb.} = 1$
1	$K_{deb.} = \sqrt{1 + \left(\frac{d_i}{D_{cal.}}\right) + \left(\frac{d_i}{D_{cal.}}\right)^2}$
> 1	$K_{deb.} = \frac{\sqrt{1 - \sum_i \left(\frac{d_i}{D_{cal.}}\right)^3}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sum_i d_i}{D_{cal.}}\right)}}$

donde:

$\sum d_i$ - es la máxima de longitudes de cuerdas de los orificios en la sección diametral más debilitada.

d_i - es el valor de cada longitud de cuerda o del diámetro del orificio.

e) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$).

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

f) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \left[\frac{S - C}{k \cdot K_{deb.} \cdot D_{cal.}} \right]^2 \cdot [\Gamma] \cdot \varphi$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr.} = \left[\frac{S - C}{k \cdot K_{deb.} \cdot D_{cal.}} \right]^2 \cdot [\Gamma]_{pr.} \cdot \varphi$$

Para el caso de que este fondo sea rebordeado se toma:

La altura del reborde: $h = 4 \cdot S$

El radio del reborde: $r = 50 \text{ mm}$

E) Metodología de diseño para fondo casquete esférico a presión interior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,72 \cdot P_{cal.} \cdot R}{\varphi \cdot [\Gamma]} \\ \frac{0,72 \cdot P_{pr.} \cdot R}{\varphi \cdot [\Gamma]_{pr.}} \end{array} \right.$$

donde,

$R = D$, Radio de curvatura en el vértice del fondo.

$H_f = 0,134 \cdot D$, Altura del fondo.

f) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$).

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

g) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \frac{1,38 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{R}$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr.} = \frac{1,38 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} \cdot (S - C)}{R}$$

F) Metodología de diseño para fondo rectangular plano a presión interior.

Todos los pasos y ecuaciones para el diseño de este tipo de fondo son iguales a los utilizados en

el diseño de la virola de sección rectangular, con la excepción de que para la presión de la columna líquida se asume que:

c) Presión de cálculo. $P_{cal.} = P_h$

METODOLOGÍAS DE DISEÑO PARA TAPAS A PRESIÓN INTERIOR

Para todas las tapas la Presión Hidrostática es igual a cero ($P_h=0$).

En todos los caso las ecuaciones de cálculo son las mismas que las utilizadas en los fondos, la tapa de casquete esférico es una excepción, su método de diseño se explica continuación:

Metodología de diseño para tapa casquete esférico a presión interior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,58 \cdot P_{cal.} \cdot R}{\varphi \cdot [\Gamma]} \\ \frac{0,58 \cdot P_{pr.} \cdot R}{\varphi \cdot [\Gamma]_{pr.}} \end{array} \right.$$

donde,

$R = D$, Radio de curvatura en el vértice de la tapa.

$H_f = 0,134 \cdot D$, Altura de la tapa.

f) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$).

Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

g) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \frac{1,73 \cdot \varphi \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{R}$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr.} = \frac{1,73 \cdot \varphi \cdot [\Gamma]_{pr.} \cdot (S - C)}{R}$$

RECOMENDACIONES

- Divulgar estas metodologías, con el objetivo de lograr su utilización intensiva y retroalimentar a los autores con las sugerencias y recomendaciones que surjan en la práctica docente y de proyectos.
- Implementar, a partir de estas metodologías, un sistema computacional para facilitar las actividades de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

ASME Boiler and pressure vessel code. Section VIII. Division 1. United Engineering Center. New York, 1992.

GOYA, V. A; Ibarra, E. V. Metodologías de cálculo de los elementos constructivos principales comunes de los aparatos químicos. (Inédito).

LASCHINSKI, A. A. Construcción de aparatos químicos soldados, manual del ingeniero. Moscú: Vneshtorgizdat, 1983.

MIJALEV, M. F. Cálculo y diseño de máquinas y aparatos de la industria química /M. F. Mi-jalev, N. P. Tretiakov, A. I. Milchenko, V. V. Zobnin. Moscú: Vneshtorgizdat, 1986.

Normas GOST para el Diseño de recipientes sometidos a presión. Moscú, 1986.