МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

СОСУДЫ И АППАРАТЫ СТАЛЬНЫЕ

Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек

РД 26-6-87

Москва 1987

У Т В Е Р Ж Д А Ю

Начальник Главного технического управления

О.В.Захаров

"16" ноября 1987

Л И С Т У Т В Е Р Ж Д Е Н И Я

Методические указания. Сосуды и аппараты стальные. Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек

РД 26-6-87

Заместитель директора НИИХИММАШа — В.В.Грязнов

Начальник НИООС — Ю.Б.Якимович

Начальник отдела прочности — В.И.Рачков

Руководитель разработки, научный сотрудник — В.Д.Бабанский

Начальник сектора НИООС — М.Л.Немчин

Начальник сектора прочности машин и аппаратов — Б.Ф.Гусаков

Научный сотрудник — И.В.Сорокина

Научный сотрудник — В.А.Рюмшин

С О Г Л А С О В А Н О:

Начальник отдела стандартизации Главного технического управления — Ю.О.Мухин

УДК Группа Г02

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

СОСУДЫ И АППАРАТЫ СТАЛЬНЫЕ

Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек

ОКСТУ 3603

РД 26-6-87

Дата введения 01.07.87

Настоящий руководящий документ устанавливает поверочные методы расчета на прочность стальных сварных цилиндрических обечаек с учетом отклонений от правильной геометрической формы (общая и локальная некруглость, смещение кромок сварных швов), работающих в условиях однократных и малоциклових статических нагрузок под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным давлением.

Руководящий документ применим для сосудов и аппаратов, изготовляемых в соответствии с требованиями ОСТ 26-291-79, когда указанным стандартом разрешается , при подтверждении специальными расчетами, изготовление с увеличенными допусками.

Руководящий документ рекомендуется также к применению головными институтами подотраслей для экспертной оценки прочности сосудов и аппаратов, у которых после изготовления установлено превышение допусков, регламентированных ОСТ 26-291-79 .

I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящий руководящий документ действителен при условии , что толщина стенки обечайки предварительно выбрана в соответствии с ГОСТ I4249-80 .

I.2. Сосуды и аппараты, работающие при многократных нагрузках, проверяют на циклическую прочность по ГОСТ 25859-83.

I.3. Обозначения, применяемые в формулах документа, соответствуют указанным в справочном приложении.

I.4. Расчетные значения допускаемого напряжения $[\sigma]$ и предела текучести σ_T материала обечайки принимаются по ОСТ 26-II-04-84.

I.5. На черт.I-4 представлены типы несовершенств обечайки с указанием расчетных величин.

I.6. Методы расчета не распространяются на случай сочетания дефектов в расчетном элементе .

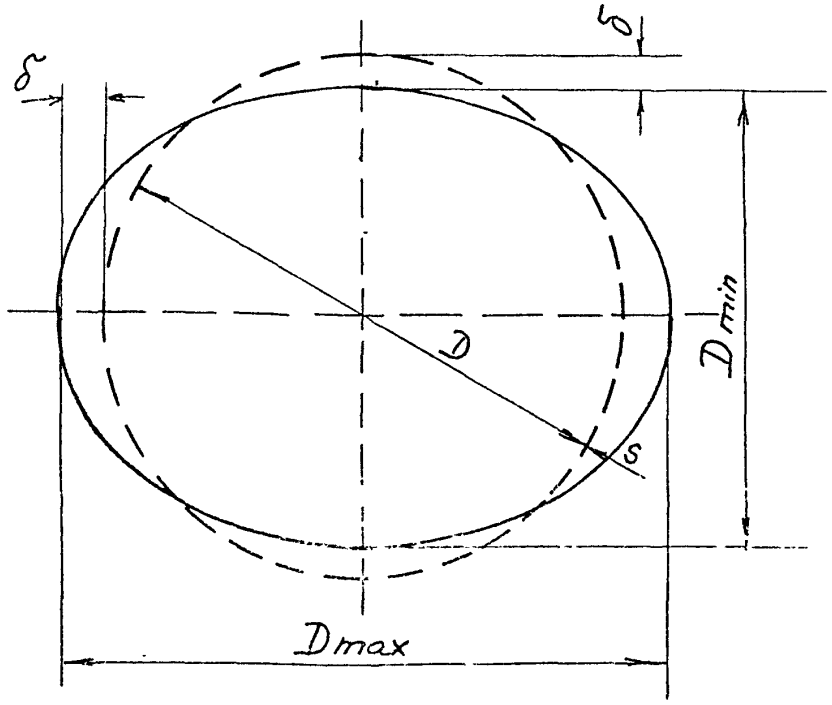
I.7. В отдельных случаях допускается проводить оценку прочности сосудов и аппаратов с учетом отклонения обечайки от правильной формы при помощи специальных исследований (например, экспериментальных исследований с применением электротензометрии).

I.8. Приведенные в руководящем документе методы расчета допустимы при условии, что неточности изготовления (за исключением смещения кромок кольцевого шва) находятся от отверстий , фланцевых соединений и т.п. на расстоянии не менее $1{,}5\sqrt{D(s-c)}$.

2. РАСЧЕТ ОБЕЧАЕК С ОТКЛОНЕНИЕМ ОТ КРУГОВОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

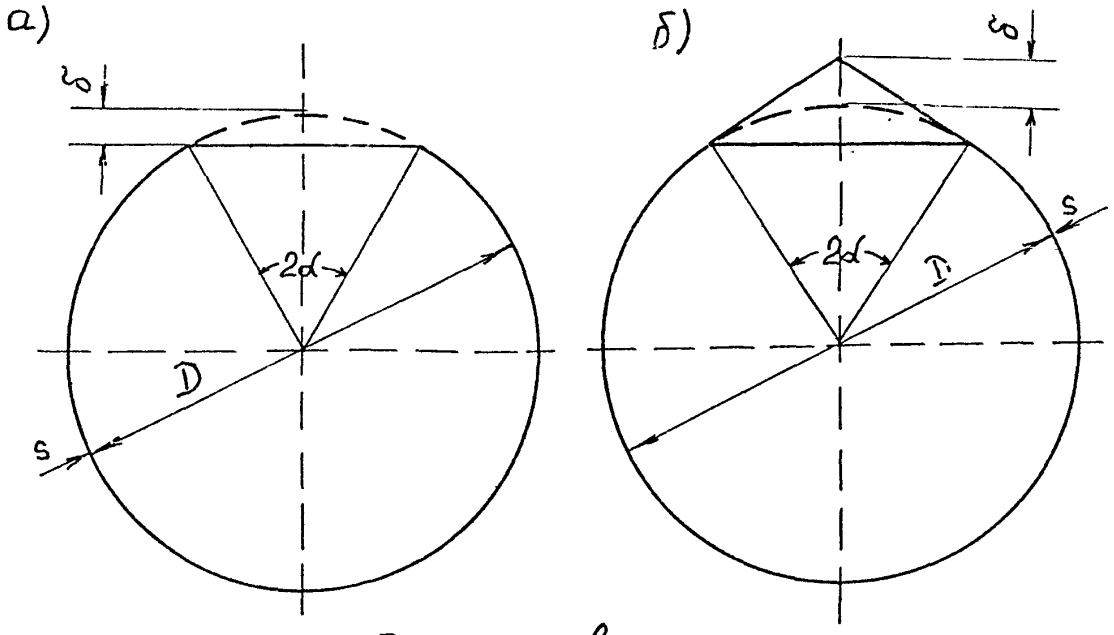
2.I. Общая некруглость

Общая некруглость



Черт 1

Локальная некруглость

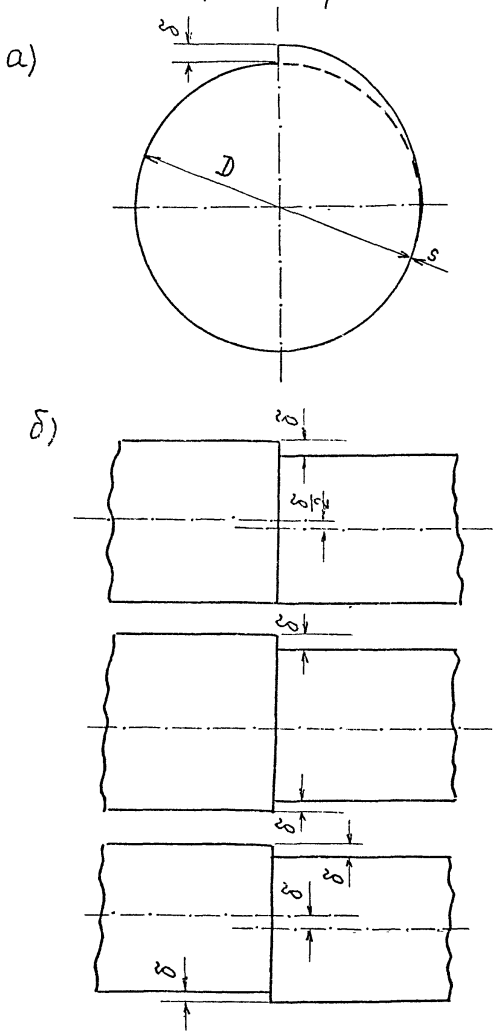


а) продольная вмятина

б) наружный увод кромок

Черт. 2

Смещение кромок

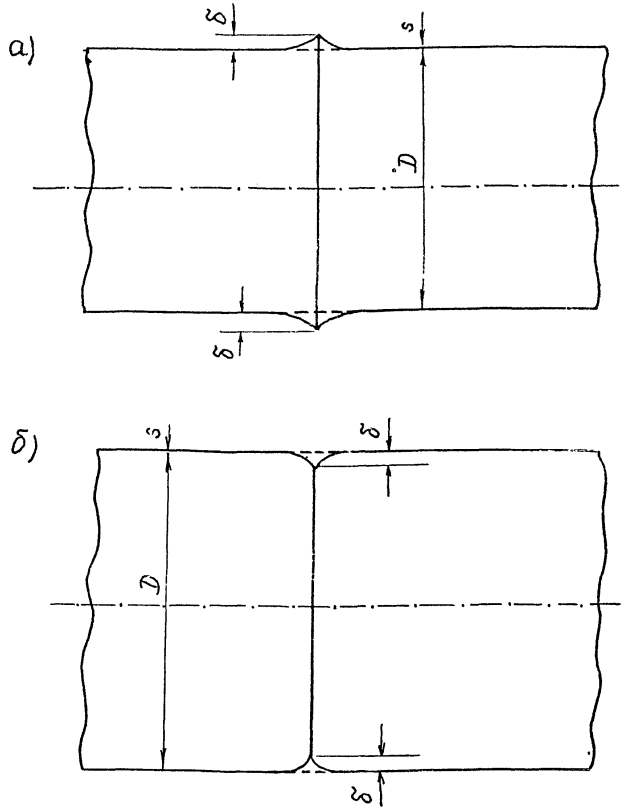


а) продольный сварной шов

б) кольцевой сварной шов

Черт.3

Увод кромок кольцевого шва



а) наружный увод

б) внутренний увод

Черт. 4

Под общей некруглостью понимается общее отклонение от круговой формы по всему периметру поперечного сечения цилиндрической оболочки (черт. I).

2.I.I. Расчет обечаек, нагруженных внутренним избыточным давлением

2.I.I.I. Допускаемое внутреннее избыточное давление рассчитывается по формуле

$$[p] = \frac{2\varphi\cdot[\sigma]\cdot(s-c)}{D+(s-c)}\cdot\lambda_0 , \qquad (I)$$

где коэффициент λ_0 определяется по графику черт.5 или рассчитывается по формуле :

$$\lambda_0 = \begin{cases} 1 \ldots\ldots\ldots\ldots & \text{при } a \leq I\% \\ \dfrac{\left(\frac{D}{200(s-c)}\right)+\sqrt{\left(\frac{D}{200(s-c)}\right)^2+1}}{\left(\frac{aD}{200(s-c)}\right)+\sqrt{\left(\frac{aD}{200(s-c)}\right)^2+1}} \ldots\ldots & \text{при } 1\% < a \leq 2\% \end{cases} \qquad (2)$$

Параметр "а" вычисляется по формуле

$$a = \frac{2(D_{max}-D_{min})}{D_{max}+D_{min}}\cdot 100\,\% \qquad (3)$$

2.I.I.2. Амплитуда напряжений σ_a в условиях циклического нагружения давлением определяется по формуле

$$\sigma_a = \frac{pD}{4(s-c)}\left[1+\frac{3a\cdot\frac{D}{200(s-c)}}{1+0{,}455\cdot\frac{p}{E}\cdot\left(\frac{D}{s-c}\right)^3}\right] \qquad (4)$$

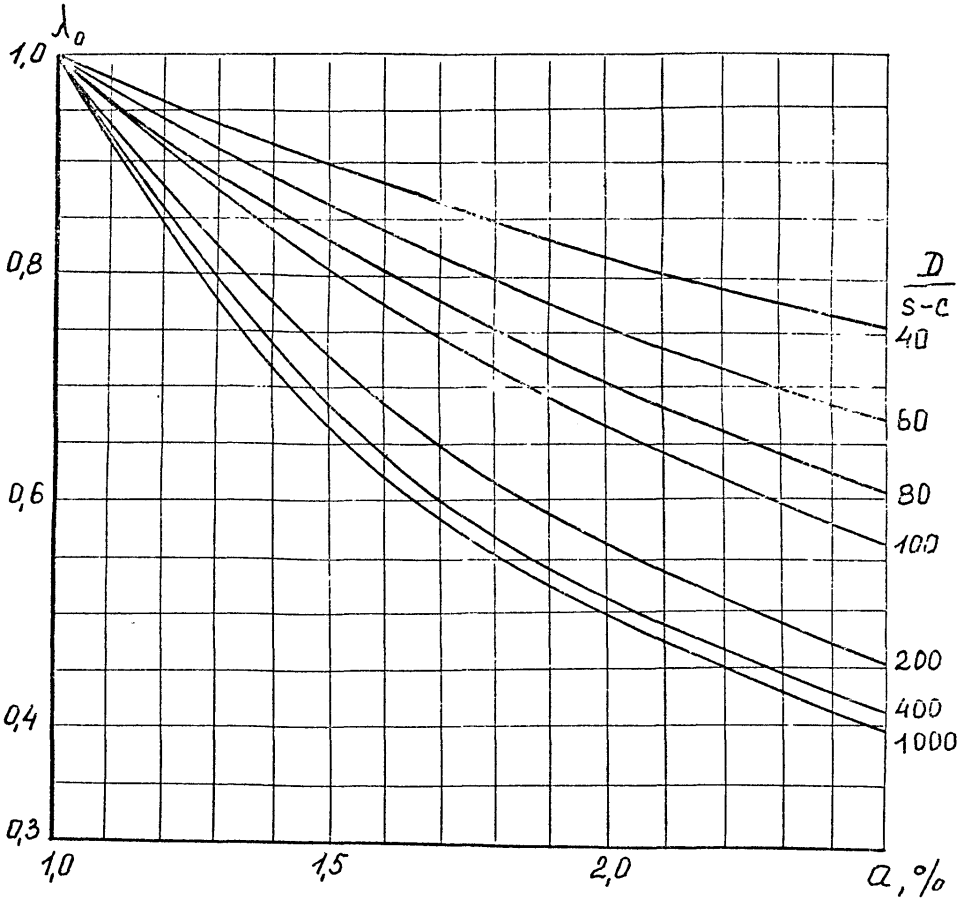
2.I.2. Расчет обечаек, нагруженных наружным давлением

2.I.2.I. Допускаемое избыточное давление определяется по формуле

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1+\left(\frac{[p]_p}{[p]^0_E}\right)^2}} \qquad (5)$$

Допускаемое давление $[p]^0_E$ из условия устойчивости овальной обечайки в пределах упругости определяется по формуле

Коэффициент λ_0



Черт. 5

$$[p]_E^0 = \begin{cases} [p]_E \ldots\ldots\ldots\ldots \text{ при } a \leq 0{,}5\,\%; \\ \dfrac{[p]_E}{1 + 1{,}5\,a \cdot f \cdot \dfrac{[p]_E}{p_T} \cdot n_y} \ldots\ldots \text{ при } 0{,}5\% < a \leq 2\,\% \end{cases} \qquad (6)$$

$$p_T = \frac{2 \cdot \sigma_T \cdot (s-c)}{D + (s-c)} \qquad (7)$$

$$f = \begin{cases} 1 - 0{,}02 \cdot \dfrac{D}{\ell} \sqrt{\dfrac{D}{s-c}} \ldots \text{при } 0{,}02 \dfrac{D}{\ell} \sqrt{\dfrac{D}{s-c}} \leq 1 \\ 0 \ldots\ldots\ldots\ldots \text{при } 0{,}02 \dfrac{D}{\ell} \sqrt{\dfrac{D}{s-c}} > 1 \end{cases} \qquad (8)$$

Допускаемое давление $[p]_p$ из условия прочности определяется по формуле

$$[p]_p = \frac{2 \cdot [\sigma]_T (s-c)}{D + (s-c)} \cdot \lambda_{oy}, \qquad (9)$$

где коэффициент λ_{oy} определяется по формуле

$$\lambda_{oy} = \begin{cases} 1 \ldots\ldots\ldots\ldots \text{ при } a \leq 0{,}5\%, \\ \dfrac{\left(\dfrac{D k_y}{400(s-c)}\right) + \sqrt{\left(\dfrac{D \cdot k_y}{400(s-c)}\right)^2 + 1}}{\left(\dfrac{a \cdot D k_y}{200(s-c)}\right) + \sqrt{\left(\dfrac{a \cdot D \cdot k_y}{200(s-c)}\right)^2 + 1}} \text{ при } 0{,}5\% < a \leq 2\% \end{cases} \qquad (10)$$

Коэффициент k_y рассчитывается по соотношениям :

$$k_y = \begin{cases} \dfrac{1}{1 - \dfrac{p}{p_{кр}}} \ldots\ldots \text{при } \dfrac{\ell}{D} > \sqrt{\dfrac{D}{2(s-c)}} \\ 1 \ldots\ldots \text{при } \dfrac{\ell}{D} \leq \sqrt{\dfrac{D}{2(s-c)}} \end{cases} \qquad (11)$$

где

$$p_{кр} = 0{,}275 \left[\frac{2(s-c)}{D}\right]^3 \cdot E \qquad (12)$$

2.1.2.2. Амплитуда напряжений в условиях циклического нагружения наружным давлением определяется по формуле

$$\sigma_a = \frac{pD}{4(s-c)} \left[1 + \frac{3a \cdot D \cdot k_y}{200(s-c)}\right], \qquad (13)$$

где k_y определяется по п. 2.1.2.1.

2.2. Локальная некруглость (черт. 2)

Под локальной некруглостью понимаются отклонения от

круговой формы поперечного сечения цилиндрической оболочки номинального диаметра, распределенные по части окружности αD, обусловленные продольной вмятиной (черт. 2а) или обусловленные наружным уводом кромок сварного продольного шва (черт. 2б).

2.2.I. Расчет обечаек, нагруженных внутренним избыточным давлением

2.2.I.I. Допускаемое избыточное давление определяется по формуле

$$[p] = \frac{2\cdot\varphi\cdot[\sigma](s-c)}{D+(s-c)}\cdot\lambda_1 , \qquad (I4)$$

где коэффициент λ_1 при толщине свариваемых листов $s \leq 20$ мм определяется по графику черт. 6 или вычисляется по формуле

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1 \ldots\ldots\ldots\ldots & \text{при } \frac{\delta}{s} \leq 0,I ; \\ \frac{1,105}{\left(\frac{\delta}{s}\right)+\sqrt{\left(\frac{\delta}{s}\right)^2+1}} \ldots & \text{при } \frac{\delta}{s} > 0,I \end{cases} \qquad (I5)$$

При толщине свариваемых листов $s > 20$ мм коэффициент λ_1 определяется по графику II черт. 6 или вычисляется по формуле (20) при $k_y = 1$.

2.2.I.2. Амплитуда напряжений в условиях циклического нагружения внутренним избыточным давлением определяется по формуле

$$\sigma_a = \frac{pD}{4(s-c)}\left[1+\frac{6\frac{\delta}{(s-c)}}{1+\frac{1,365}{n^2-1}\cdot\frac{p}{E}\cdot\left(\frac{D}{s-c}\right)^3}\right] \qquad (I6)$$

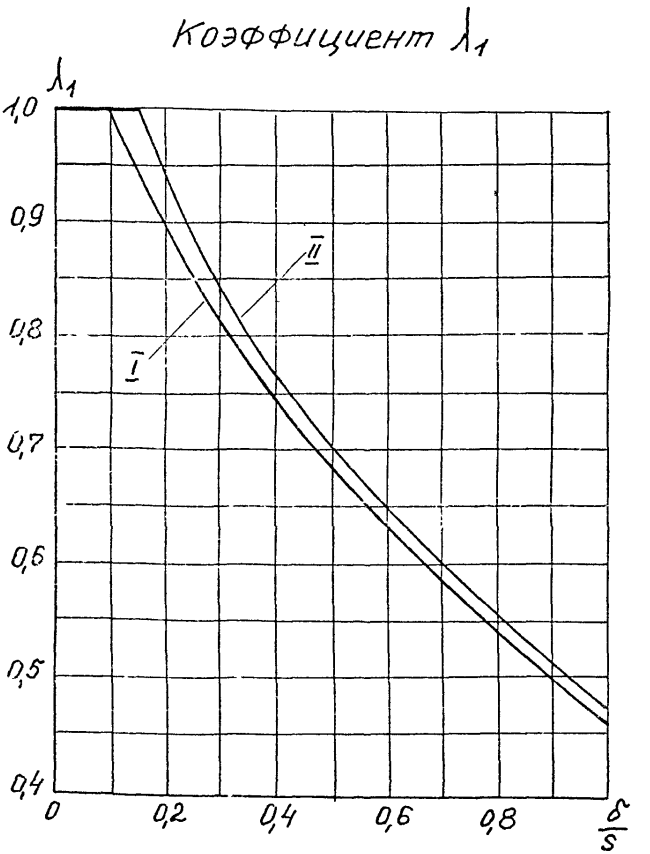
где $n = \frac{\pi}{2\alpha}$ - параметр, характеризующий зоны отклонения.

2.2.2. Расчет обечаек, нагруженных наружным давлением

2.2.2.I. Допускаемое избыточное давление $[p]$ определяется по формуле (5) с использованием формул (6),(7) и(8), при этом параметр "а" , входящий в формулу (6), определяется по формуле

$$a = \begin{cases} \frac{4\delta}{D}\cdot 100\% & \text{в случае продольной вмятины (черт. 2 а)} \\ 0 & \text{в случае наружного увода кромок (черт.2 б)} \end{cases} \qquad (I7)$$

Величина давления $[p]_p$, входящая в формулу (5), определяется :



Черт. 6

I – для $s \leq 20$ мм

II – для $20 < s \leq 50$ мм

I) в случае продольной вмятины (черт. 2 а)

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} \cdot \lambda_{1y}, \qquad (18)$$

где коэффициент при толщине листов $s \leq 20$ мм определяется по формуле

$$\lambda_{1y} = \begin{cases} 1 \ldots\ldots\ldots & \text{при } \frac{\delta}{s} \leq 0{,}I \\ \dfrac{1{,}105}{\left(\frac{\delta}{s}k_y\right)+\sqrt{\left(\frac{\delta}{s}k_y\right)^2+1}} \ldots & \text{при } \frac{\delta}{s} > 0{,}I \end{cases}, \qquad (I9)$$

при толщине листов от 20 до 50 мм коэффициент λ_{1y} определяется по формуле

$$\lambda_{1y} = \begin{cases} 1 \ldots\ldots & \text{при } \frac{\delta}{s} \leq 0{,}15 \\ \dfrac{1{,}16}{\left(\frac{\delta}{s}k_y\right)+\sqrt{\left(\frac{\delta}{s}k_y\right)^2+1}} \ldots & \text{при } \frac{\delta}{s} > 0{,}15 \end{cases} \qquad (20)$$

2) в случае наружного увода кромок (черт.2б)

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} \cdot \lambda_1, \qquad (2I)$$

где λ_1 определяется по формуле (I5)

2.2.2.2. Амплитуда напряжений в условиях циклического нагружен наружным давлением определяется по формуле

$$\sigma_a = \frac{pD}{4(s-c)}\left[1 + \frac{6\frac{\delta}{(s-c)}\cdot k_y}{1+\frac{1{,}365}{n^2-1}\frac{p}{E}\cdot\left(\frac{D}{s-c}\right)^3}\right] \qquad (22)$$

3. СМЕЩЕНИЕ КРОМОК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

3.I. Смещение кромок продольного сварного шва (черт.3а)

3.I.I. Расчет обечаек ,нагруженных внутренним избыточным давлением

3.I.I.I.Допускаемое избыточное давление рассчитывается по формуле

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} \cdot \lambda_1, \qquad (23)$$

где коэффициент λ_1 определяется по графику черт.6 или по формуле (15).

3.1.1.2. Амплитуда напряжений в условиях циклического нагружения избыточным давлением определяется по формуле

$$\sigma_a = \frac{pD}{4(s-c)}\left[1 + 3\frac{\delta}{s-c}\right] \qquad (24)$$

3.1.2. Расчет обечаек, нагруженных наружным давлением

3.1.2.1. Допускаемое избыточное давление определяется по формуле (5), в которой принимается : $[p]^0_E = [p]_E$, определяемое по разделу2ГОСТ 14249-80; допускаемое давление из условия прочности определяется по формуле

$$[p]_P = \frac{2\cdot[\sigma](s-c)}{D+(s-c)}\cdot\lambda_1, \qquad (25)$$

где коэффициент λ_1 определяется по п. 2.2.1.1.

3.1.2.2. Амплитуда условных упругих напряжений при циклическом нагружении избыточным давлением определяется по формуле (24).

3.2. Отклонения в кольцевом сварном шве

К отклонениям в кольцевом сварном шве относятся случаи смещения кромок стыкуемых царг (черт.3б) , а также случаи внутреннего или наружного увода кромок (черт. 4)

3.2.1. Расчет обечаек ,нагруженных внутренним давлением

3.2.1.1. Допускаемое внутреннее избыточное давление рассчитывается по формуле

$$[p] = \frac{\varphi\cdot[\sigma](s-c)\cdot \min\{4\lambda_1; 2\}}{D+(s-c)} \qquad (26)$$

где коэффициент λ_1 определяется по графикам черт.6 или по формуле п. 2.2.1.1.

3.2.1.2. Амплитуда напряжений при циклическом нагружении избыточным давлением определяется по формуле

$$\sigma_a = \frac{pD}{4(s-c)}\cdot \max\{k_1; k_2\} \qquad (27)$$

где коэффициенты k_1 и k_2 определяются по графикам черт.7 или рассчитываются по формулам

$$k_1 = 0{,}5\left(1 + 3\frac{\delta}{s-c}\right) \qquad (28)$$

$$k_2 = 1 + 0{,}45\frac{\delta}{s-c} \qquad (29)$$

3.2.2. Расчет обечаек, нагруженных наружным давлением

3.2.2.I. Поверочный расчет выполняется по ГОСТ I4249-80.

3.2.2.2. Амплитуда напряжений при циклическом нагружении избыточным давлением определяется по формула (27) с использованием формул (28) и (29).

4. ОЦЕНКА МАЛОЦИКЛОВОЙ ПРОЧНОСТИ

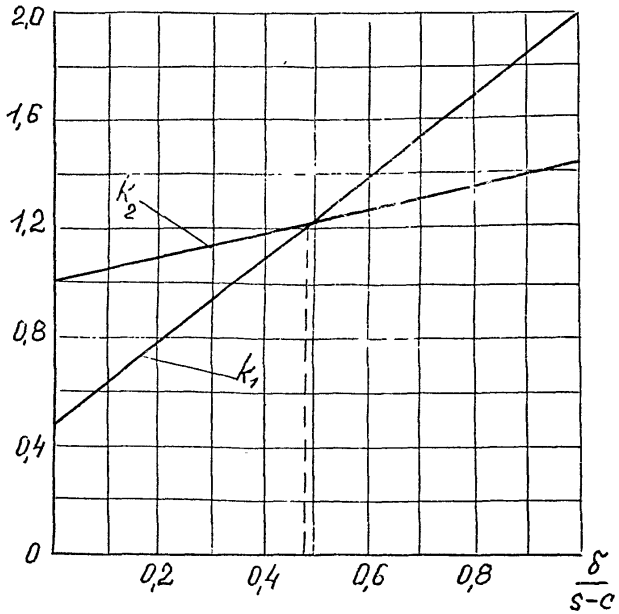
4.I. Оценка малоцикловой прочности (определение допускаемой амплитуды напряжений $[\sigma_A]$ или допускаемого числа циклов нагружения $[N]$) выполняется по формулам ГОСТ 25859-83 (разд.6) при $\sigma_A = K_э \sigma_a$,

где σ_a - определяется по формулам соответствующих разделов настоящего стандарта в зависимости от вида отклонения;

$K_э$ - принимается по таблице .

4.2. В случае , если стыковой шов не совпадает с расчетным сечением (черт. I-3) и удален от последнего на расстояние более, чем $0{,}5\sqrt{D(s-c)}$, в расчет принимается $K_э = I$.

Коэффициенты k_1 и k_2



Черт.7

Характеристика сварного шва	Схема сварного шва	Эффективный коэффициент концентрации напряжений	
		Углеродистая сталь	Низколегированная и аустенитные стали
Стыковой сварной шов с плавным переходом и полным проваром		I,0	I,0
Стыковой сварной шов с подкладным листом по всей длине шва		I,2	I,4
Стыковой сварной шов (односторонний) с неполным проваром		I,5	I,8
Стыковой шов со смещением кромок		I,3	I,5

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Справочное

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Наименование	Обозначение
Параметр, характеризующий некруглость, %	a
Сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки, мм (см),	c
Внутренний диаметр идеальной обечайки, мм (см)	D
Наибольший наружный диаметр обечайки, мм (см)	D_{max}
Наименьший наружный диаметр обечайки, мм (см)	D_{min}
Модуль продольной упругости при расчетной температуре, МПа (кгс/см^2)	E
Поправочный коэффициент	f
Безразмерные коэффициенты	k_1, k_2, k_y
Эффективный коэффициент концентрации напряжений для сварных швов	$K_э$
Допускаемое число циклов нагружения	$[N]$
Параметр зоны некруглости	n
Коэффициент запаса устойчивости	n_y
Расчетное внутреннее избыточное или наружное давление, МПа (кгс/см^2)	p
Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление, МПа (кгс/см^2)	$[p]$
Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости для обечайки с отклонениями, МПа (кгс/см^2)	$[p]^o_E$
Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости для оболочки круговой формы (без дефектов), МПа (кгс/см^2)	$[p]_E$

Наименование	Обозначение
Критическое давление длинной обечайки, МПа(кгс/см^2)	$p_{кр}$
Давление текучести, МПа(кгс/см^2)	$p_т$
Допускаемое наружное давление из условия прочности при φ =I, МПа(кгс/см^2)	$[p]_p$
Исполнительная толщина стенки обечайки, мм(см)	s
Половина центрального угла зоны некруглости, радиан (черт.2)	α
Величина отклонения от идеальной круговой формы или величина смещения и увода кромок, мм(см) (черт. I-4)	δ
Безразмерные коэффициенты	$\lambda_0, \lambda_{0у}, \lambda_1, \lambda_{1у}$
Амплитуда напряжений, МПа (кгс/см^2)	σ_a
Расчетная амплитуда напряжений, МПа(кгс/см^2)	σ_A
Допускаемая амплитуда напряжений, МПа(кгс/см^2)	$[\sigma_A]$
Допускаемое напряжение для материала обечайки при расчетной температуре, МПа(кгс/см^2)	$[\sigma]$
Предел текучести материала при расчетной температуре, МПа(кгс/см^2)	$\sigma_т$
Коэффициент прочности сварных швов	φ
Расчетная длина гладкой обечайки, мм(см)	ℓ

Величины $\rho, c, \varphi, E, n_у, [p]_E, \ell$ определяются в соответствии с ГОСТ I4249-80

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Справочное

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные для круговой цилиндрической обечайки :

D = 1600 мм t = 100°С

ℓ = 1600 мм φ = 0,9

s = 6 мм

$s-c$ = 5 мм. p = 0,8 МПа

c = 1 мм

В аппарате возможно образование вакуума

Материал обечайки аппарата - сталь ВСт.3

E = 1,91.10^5 МПа (по ГОСТ 14249-80)

$[\sigma]$ = 149,0 МПа (ОСТ 26-11-04-84)

$\sigma_т$ = 230,0 МПа

Пример 1 Общая некруглость (п. 2.1)

δ = 4 мм ; $a = \frac{2(D_{max} - D_{min})}{D_{max} + D_{min}} \cdot 100\%$

2.1.1. Расчет обечаек, нагруженных внутренним избыточным давлением

2.1.1.1. Допускаемое избыточное давление рассчитывается по формуле

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} \cdot \lambda_0 ,$$

где коэффициент λ_0 определяется по формуле (2) :

λ_0 = 1 при a = 1 %

$$[p] = \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 149 \cdot 5}{1600+5} \cdot 1 = 0,836 \text{ МПа}$$

p =0,8 МПа < $[p]$ = 0,836 МПа .

Полученный результат сравним со значением, рассчитанным в соответствии с ГОСТ 14249-80 (п.2.3).

(2.3.1). Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением

(2.3.I.2). Допускаемое внутреннее избыточное давление следует рассчитывать по формуле

$$[p] = \frac{2[\sigma]\cdot\varphi_p(s-c)}{D+(s-c)} = \frac{2\cdot 149\cdot 0{,}9\cdot 5}{1600+5} = 0{,}836 \text{ МПа}$$

При общей некруглости I % при действии внутреннего давления результаты по РД 26-6-87 и ГОСТ I4249-80 совпадают (при $\varphi_p = \varphi$).

2.I.2. Расчет обечаек, нагруженных наружным давлением

В соответствии с п. 2.I.2.I. определяем допускаемое наружное давление при заданной общей некруглости по формуле

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1+\left(\frac{[p]_p}{[p]_E^{\circ}}\right)^2}},$$

где

$$[p]_E^{\circ} = \frac{[p]_E}{1+1{,}5a\cdot f\cdot\frac{[p]_E\cdot n_T}{p_T}}, \text{ т.к. } a > 0{,}5\,\% \ (a = I\,\%)$$

$$[p]_E = \frac{18\cdot 10^{-6}E}{n_y\cdot B_1}\cdot\frac{D}{\ell}\left[\frac{100(s-c)}{D}\right]^2\cdot\sqrt{\frac{100(s-c)}{D}}$$

(по ГОСТ I4249-80)

$$B_1 = \min\left\{1{,}0\ ;\ 8{,}15\frac{D}{\ell}\sqrt{\frac{D}{100(s-c)}}\right\}$$

$$B_1 = \min\left\{1{,}0\ ;\ 8{,}15\frac{1600}{1600}\sqrt{\frac{1600}{100\cdot 5}} \approx 14{,}6\right\} = 1\ ;$$

$$[p]_E = \frac{18\cdot 10^{-6}\cdot 1{,}91\cdot 10^5}{2{,}4\cdot 1}\cdot\frac{1600}{1600}\cdot\left[\frac{100\cdot 5}{1600}\right]^2\cdot\sqrt{\frac{100\cdot 5}{1600}} = 0{,}078 \text{ МПа};$$

$(n_y = 2{,}4)$

$$p_T = \frac{2\sigma_T(s-c)}{D+(s-c)} = \frac{2\cdot 230\cdot 5}{1600+5} = 1{,}433 \text{ МПа};$$

При этом

$$0{,}02\frac{D}{\ell}\sqrt{\frac{D}{s-c}} = 0{,}02\cdot\frac{1600}{1600}\sqrt{\frac{1600}{5}} \approx 0{,}36 < 1$$

$$f = 1 - 0{,}02\cdot\frac{D}{\ell}\sqrt{\frac{D}{s-c}} \quad \text{при } 0{,}02\frac{D}{\ell}\sqrt{\frac{D}{s-c}} < 1$$

$$f = 1 - 0{,}02\cdot\frac{1600}{1600}\sqrt{\frac{1600}{5}} = 1 - 0{,}36 = 0{,}64\ .$$

$$[p]_E = \frac{0{,}078}{1 + 1{,}5 \cdot 1 \cdot 0{,}64 \cdot \frac{0{,}078 \cdot 2{,}4}{1{,}433}} = 0{,}078 \cdot 0{,}889 \simeq 0{,}069 \text{ МПа}$$

Условие $\frac{l}{D} \leq \sqrt{\frac{D}{2(s-c)}} \leftrightarrow \frac{1600}{1600} = 1 \leq \sqrt{\frac{1600}{2 \cdot 5}} = 12{,}65$

выполняется, поэтому $k_y = 1$.

При $a = 1\% > 0{,}5\%$

$$\lambda_{oy} = \frac{\frac{Dk_y}{400(s-c)} + \sqrt{\left(\frac{D \cdot k_y}{400(s-c)}\right)^2 + 1}}{\frac{aDk_y}{200(s-c)} + \sqrt{\left(\frac{aDk_y}{200(s-c)}\right)^2 + 1}};$$

$$\lambda_{oy} = \frac{\frac{1600 \cdot 1}{400 \cdot 5} + \sqrt{\left(\frac{1600 \cdot 1}{400 \cdot 5}\right)^2 + 1}}{\frac{1 \cdot 1600 \cdot 1}{200 \cdot 5} + \sqrt{\left(\frac{1 \cdot 1600 \cdot 1}{200 \cdot 5}\right)^2 + 1}} = 0{,}600;$$

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s-c)}{D + (s-c)} \cdot \lambda_{oy};$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot 149 \cdot 5}{1600 + 5} \cdot 0{,}6 = 0{,}554 \text{ МПа};$$

$$[p] = \frac{0{,}554}{\sqrt{1 + \left(\frac{0{,}554}{0{,}069}\right)^2}} \cong 0{,}069 \text{ МПа}.$$

Полученный результат сравним со значением, рассчитанным по ГОСТ 14249-80 (п. 3.2.2).

$$[p]_p = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = \frac{2 \cdot 149 \cdot 5}{1600 + 5} = 0{,}928 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}} = \frac{0{,}928}{\sqrt{1 + \left(\frac{0{,}928}{0{,}078}\right)^2}} \cong 0{,}0782 \text{ МПа}$$

При действии наружного давления допускаемое давление $[p]$, вычисленное по РД 26-6-87с учетом общей некруглости (при $a = 1\,\%$), на 11,5 % меньше допускаемого давления $[p]$, вычисленного по ГОСТ 14249-80 для круговой цилиндрической обечайки при отсутствии отклонений от правильной формы .

Пример 2. Локальная некруглость (п. 2.2.) , обусловленная продольной вмятиной (черт. 2а).

$$\delta = 1 \text{ мм} \left(\frac{\delta}{s} = \frac{1}{6} = 0{,}167 \; ; \; a = \frac{4\delta}{D} \cdot 100\% = \frac{4 \cdot 1 \cdot 100}{1600} = 0{,}25\% \right)$$

2.2.1. Расчет обечаек, нагруженных внутренним избыточным давлением

2.2.1.1. Допускаемое избыточное давление определяется по формуле

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} \cdot \lambda_1 ,$$

где коэффициент λ_1 вычисляется по формуле

$$\lambda_1 = \frac{1{,}105}{\frac{\delta}{s} + \sqrt{\left(\frac{\delta}{s}\right)^2 + 1}} \quad , \text{ т.к. } \frac{\delta}{s} = 0{,}167 > 0{,}1$$

$$\lambda_1 = \frac{1{,}105}{\sqrt{0{,}167^2 + 1} + 0{,}167} = 0{,}936$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 0{,}9 \cdot 149 \cdot 5}{1600 + 5} \cdot 0{,}936 = 0{,}782 \text{ МПа} < p = 0{,}8 \text{ МПа}$$

2.2.2. Расчет обечаек, нагруженных наружным давлением

2.2.2.1. Допускаемое избыточное давление определяется по формуле

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]^o_E}\right)^2}}$$

По ГОСТ 14249-80 без учета смещения кромок

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} = \frac{2\cdot 0{,}9\cdot 149\cdot 5}{1600+5} = 0{,}836 \text{ МПа}$$

3.1.2. Расчет обечаек, нагруженных наружным давлением

3.1.2.1. Допускаемое избыточное давление определяется по формуле (5), в которой принимается : $[p]^{o}_{E} = [p]_{E}$, определяемое по разделу ГОСТ 14249-80 ;

допускаемое давление из условия прочности определяется по формуле

$$[p]_{p} = \frac{2\cdot[\sigma]\cdot(s-c)}{D+(s-c)}\cdot\lambda_1$$

где коэффициент λ_1 определяется по п.2.2.1.1.

$$\lambda_1 = \frac{1{,}105}{\frac{\delta}{s}+\sqrt{\left(\frac{\delta}{s}\right)^2+1}} = \frac{1{,}105}{0{,}167+\sqrt{0{,}167^2+1}} = 0{,}936 \;;$$

$$[p]_{p} = \frac{2\cdot 149\cdot 5}{1600+5}\cdot 0{,}936 = 0{,}869 \text{ МПа};$$

Далее

$$[p] = \frac{[p]_{p}}{\sqrt{1+\left(\frac{[p]_{p}}{[p]^{o}_{E}}\right)^2}}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости определяется по формуле

$$[p]^{o}_{E} = [p]_{E} = \frac{18\cdot 10^{-6}\cdot E}{n_y\cdot B_1}\cdot\frac{D}{\ell}\cdot\left[\frac{100(s-c)}{D}\right]^2\cdot\sqrt{\frac{100(s-c)}{D}},$$

где $$B_1 = \min\left\{1{,}0\;;\; 8{,}15\frac{D}{\ell}\sqrt{\frac{D}{100(s-c)}}\right\}.$$

Сравнение результатов расчета по РД 26-6-87 и по ГОСТ I4249-80

I) $\frac{0{,}782-0{,}755}{0{,}782}\cdot 100\% = 3{,}6\%$

При действии наружного давления допускаемое давление $[p]$, вычисленное по РД 26-6-87 с учетом локальной некруглости ($\frac{\delta}{s-c}$ =0,2) снизилось на 3,6 %.

2) $\frac{0{,}836-0{,}782}{0{,}836}\cdot 100\% = 6{,}4\%$

Допускаемое внутреннее давление при учете локальной некруглости снизилось на 6,4 % при δ = 1 мм ($\frac{\delta}{s-c}$ = 0,2)

Пример 3 Смещение кромок в соответствии с черт.3а при δ=I мм

2.2.I. Расчет обечаек, нагруженных внутренним избыточным давлением

2.2.I.I. Допускаемое избыточное давление определяется по формуле

$$[p]=\frac{2\varphi[\sigma](s-c)}{D+(s-c)}\cdot\lambda_1$$

где коэффициент λ_1 при толщине свариваемых листов s < 20 мм определяется по графику черт. 6 или вычисляется по формуле

$$\lambda_1=\begin{cases}1 \ldots\ldots\ldots\ldots \text{при } \frac{\delta}{s}\le 0{,}1\\ \frac{1{,}105}{\left(\frac{\delta}{s}\right)+\sqrt{\left(\frac{\delta}{s}\right)^2+1}} \ldots\ldots \text{при } \frac{\delta}{s}>0{,}1\end{cases}$$

$$\frac{\delta}{s}=\frac{1}{6}=0{,}167$$

$$\lambda_1=\frac{1{,}105}{0{,}167+\sqrt{0{,}167^2+1}}=0{,}936\ ;$$

$$[p]=\frac{2\cdot 0{,}9\cdot 149\cdot 5}{1600+5}\cdot 0{,}936=0{,}783\ \text{МПа}\ ;$$

$$[p]=0{,}783\ \text{МПа}$$

$$[p]_E^{\circ} = \frac{[p]_E}{1 + 1{,}5\,a\,f\,\frac{[p]_E \cdot n_y}{p_T}} = \frac{0{,}078}{1 + 1{,}5 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}64 \cdot \frac{0{,}078 \cdot 2{,}4}{1{,}433}} = 0{,}076\ \text{МПа};$$

$$[p]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D}{2{,}4 \cdot B_1 \cdot \ell} \cdot \left[\frac{100(s-c)}{1600}\right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100(s-c)}{D}} =$$

$$= \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}91 \cdot 10^5}{2{,}4 \cdot 1} \cdot \frac{1600}{1600} \cdot \left[\frac{100 \cdot 5}{1600}\right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot 5}{1600}} = 0{,}078\ \text{МПа};$$

$$B_1 = \min\left\{1{,}0;\ 8{,}15 \cdot \frac{1600}{1600} \cdot \sqrt{\frac{1600}{100 \cdot 5}} = 14{,}6\right\} = 1;$$

$$p_T = \frac{2 \cdot \sigma_T (s-c)}{D + (s-c)} = \frac{2 \cdot 230 \cdot 5}{1600 + 5} = 1{,}433\ \text{МПа};$$

$$k_y = 1, \text{ т.к. } \frac{\ell}{D} = \frac{1600}{1600} = 1 < \sqrt{\frac{D}{2(s-c)}} = \sqrt{\frac{1600}{2 \cdot 5}} = 12{,}65$$

$$\lambda_{1y} = \frac{1{,}105}{\left(\frac{\delta}{s} \cdot k_y\right) + \sqrt{\left(\frac{\delta}{s} k_y\right)^2 + 1}}, \text{ т.к. } \frac{\delta}{s} > 0{,}1 \text{ и } s < 20\ \text{мм}$$

$$\lambda_{1y} = \frac{1{,}105}{(0{,}167 \cdot 1) + \sqrt{(0{,}167 \cdot 1)^2 + 1}} = 0{,}936$$

$$[p]_p = \frac{2\,[\sigma]\,(s-c)}{D + (s-c)} \cdot \lambda_{1y} =$$

$$= \frac{2 \cdot 149 \cdot 5}{1600 + 5} \cdot 0{,}936 = 0{,}869\ \text{МПа};$$

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E^{\circ}}\right)^2}} = \frac{0{,}869}{\sqrt{1 + \left(\frac{0{,}869}{0{,}076}\right)^2}} = 0{,}0755\ \text{МПа}.$$

$$B_1 = \min\left\{1{,}0;\ 8{,}15\,\frac{1600}{1600}\sqrt{\frac{1600}{100\cdot 5}} = 14{,}6\right\} = 1$$

$$[p]_E = \frac{18\cdot 10^{-6}\cdot 1{,}91\cdot 10^5}{2{,}4\cdot 1}\cdot\frac{1600}{1600}\cdot\left[\frac{100\cdot 5}{1600}\right]^2\sqrt{\frac{100\cdot 5}{1600}} = 0{,}078\ \text{МПа}$$

$$[p] = \frac{0{,}869}{\sqrt{1+\left(\frac{0{,}869}{0{,}078}\right)^2}} = 0{,}0778\ \text{МПа}$$

Пример 4 Смещение кромок сварных соединений (по черт. 3б) при δ = I мм

3.2.I. Расчет обечаек, нагруженных внутренним давлением

3.2.I.I. Допускаемое внутреннее избыточное давление рассчитывается по формуле

$$[p] = \frac{\varphi\,[\sigma](s-c)}{D+(s-c)}\cdot\min\{4\lambda_1;\ 2\}$$

где коэффициент λ_1 определяется по графикам черт.6 (или черт. 7) или по формуле п. 2.2.I.I.

$$\lambda_1 = \frac{1{,}105}{0{,}167+\sqrt{0{,}167^2+1}} = 0{,}936 \qquad \left(\frac{\delta}{s} = 0{,}167 > 0{,}1\right)$$

$$[p] = \frac{0{,}9\cdot 149\cdot 5}{1600+5}\cdot 2 = 0{,}836\ \text{МПа};$$

$$\min\{4\lambda_1;\ 2\} = \min\{4\cdot 0{,}936;\ 2\} = \min\{3{,}744;\ 2\} = 2$$

По ГОСТ I4249-80 без учета смещения кромок сварных соединений

$$[p] = \frac{2\,\varphi\,[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} = \frac{2\cdot 0{,}9\cdot 149\cdot 5}{1600+5} = 0{,}836\ \text{МПа}$$

При смещении кромок δ = I мм результаты расчета по РД совпали с результатами расчета по ГОСТ I4249-80.

3.I.2. Расчет обечаек, нагруженных наружным давлением

3.I.2.I. Допускаемое избыточное давление определяется по формуле (5), в которой принимается

$[p]_E^{\circ} = [p]_E$, определяемое по ГОСТ I4249-80

Допускаемое давление из условия прочности определяется по формуле

$$[p]_p = \frac{2 \cdot [\sigma](s-c)}{D + (s-c)} \cdot \lambda_1$$

где коэффициент λ_1 определяется по п. 2.2.I.I.

$$\lambda_1 = \frac{1,105}{0,167 + \sqrt{0,167^2+1}} = 0,936 \qquad \left(\frac{\delta}{s} = 0,167 > 0,1\right)$$

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E^{\circ}}\right)^2}} ;$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot 149 \cdot 5}{1600 + 5} \cdot 0,936 = 0,869 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости определяется по ф-ле (I3) ГОСТ I4249-80

$$[p]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot 1,91 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 1} \cdot \frac{1600}{1600} \cdot \left[\frac{100\ 5}{1600}\right]^2 \sqrt{\frac{100 \cdot 5}{1600}} = 0,078 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{0,869}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,869}{0,078}\right)^2}} = 0,0778 \text{ МПа}.$$

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

I.	РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН	НИИХИММАШ
2.	ИСПОЛНИТЕЛИ	В.И.Рачков,к.т.н.; Ю.Б.Якимович ; В.Д.Бабанский(руководитель темы) М.Л.Немчин; И.В.Сорокина ; В.А.Рюмшин ;
2.	УТВЕРЖДЕН	Главным техническим управлением Министерства Начальник О.В.Захаров
3.	ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ	письмом Главного технического управления от 16.04.87 N 11-10-4/499
4.	ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ	
5.	ССЫЛОЧНЫЕ ДОКУМЕНТЫ	

Обозначение документа, на который дана ссылка	Номер пункта.подпункта перечисления приложения
ГОСТ I4249-80	I.I; 3.I.2.I; 3.2.2.I; приложения справочные (1;2)
ГОСТ 25859-83	I2 ; 4.I.
ОСТ 26-II-04-84	I.4
ОСТ 26-291-79	вводная часть

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

Номер изменения	Номер листа (страницы)				Номер документа	Подпись	Дата внесения изменения	Дата введения изменения
	Измененного	Замененного	Нового	Аннулированного				