

Основные расчетные параметры

Нормативные ссылки

- **ГОСТ Р 52857.1-2007 - ГОСТ Р 52857.12-2007
«СОСУДЫ И АППАРАТЫ. Нормы и методы
расчета на прочность»**
 - № 1 – Общие требования
 - № 2 – Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек»
 - № 3 – Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер
 - № 4 – Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений и т.д.

Общие положения

- Расчет на прочность необходимо проводить для всех прогнозируемых состояний сосудов, возникающих во время их эксплуатации, испытания, транспортировки, монтажа.
- При этом следует учитывать все нагрузки и внешние факторы:
 - внутреннее(внешнее)давление,
 - температуру окружающей среды и рабочую,
 - статическое давление
 - нагрузки от массы сосуда и содержимого
 - инерционные нагрузки при движении, остановках и колебаниях, от ветровых и сейсмических воздействий
 - реактивные усилия от опор, креплений, трубопроводов и т.д.
 - нагрузки от стеснённости температурных деформаций
 - усталость при переменных нагрузках, эрозию, коррозию и т.д.

Температура

- **Рабочая температура** $t_{\text{раб}}$ – ЭТО температура содержащейся или перерабатываемой среды в аппарате при нормальном протекании в нем технологического процесса.
- **Расчетная температура** $t_{\text{рас}}$ – ЭТО температура стенки для определения физико-механических характеристик конструкционного материала и допускаемых напряжений.

Определение расчетной температуры

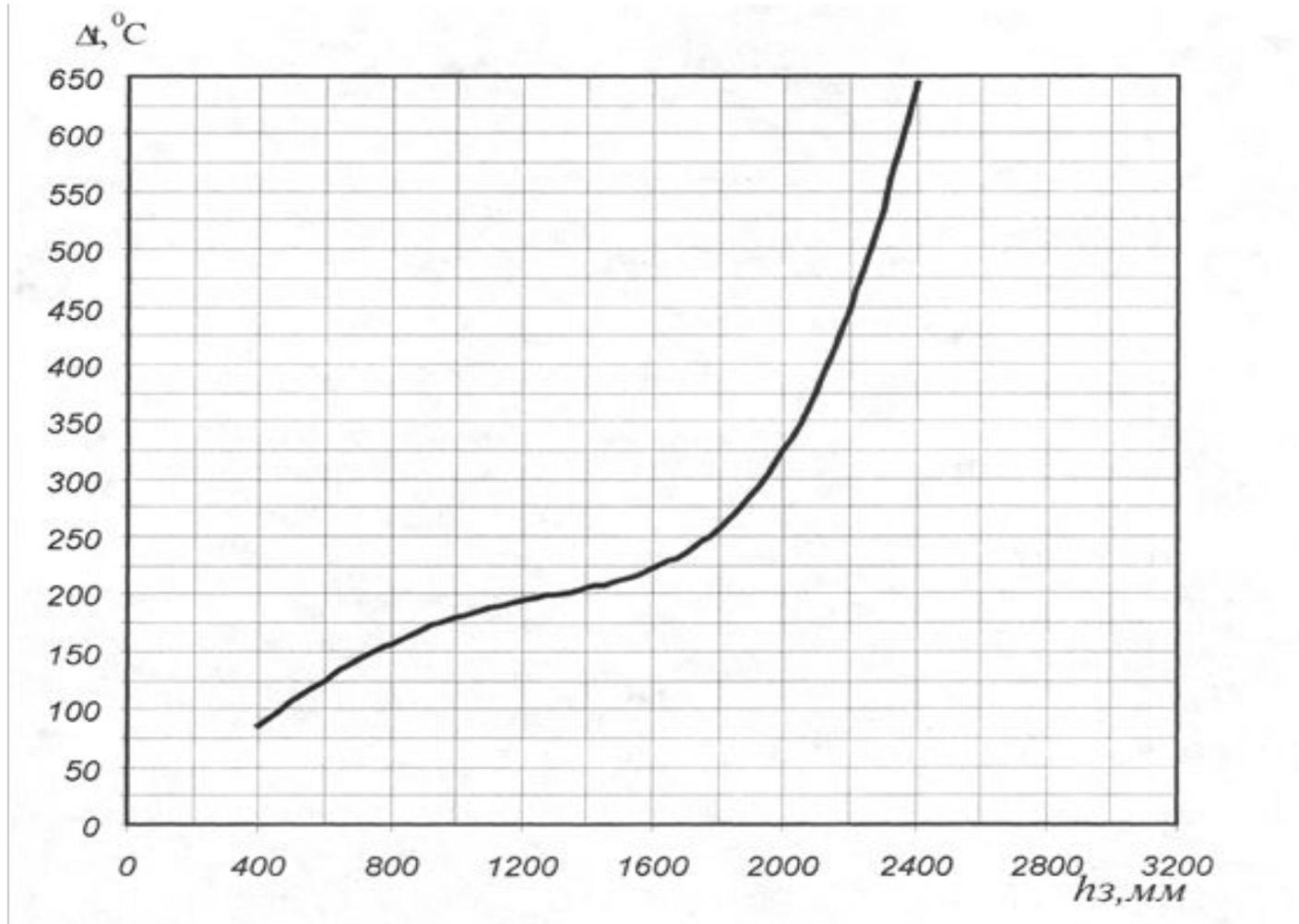
- Расчетная температура корпуса

$$t_{\text{рас}} = \max\{ t_{\text{раб}} ; 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \},$$

- Расчетная температура опоры

$$t_{\text{рас оп.}} = \max\{ t_{\text{рас}} - \Delta t ; 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \},$$

Зависимость перепада температуры от высоты опоры



- При температуре ниже 20°C за расчетную температуру при определении допускаемых напряжений принимают температуру 20°C .
- При обогреве открытым пламенем, отработанными газами, отработанными газами или электронагревателями расчетную температуру принимают равной температуре среды, увеличенной на 20°C при закрытом обогреве и на 50°C при прямом обогреве, если нет более точных данных

Давление

□ **Рабочее давление $P_{\text{раб}}$** – максимальное внутреннее избыточное или наружное давление среды в аппарате при нормальном протекании технологического процесса без учета гидростатического давления и допускаемого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного устройства (клапана и др.).

Если технологический процесс в аппарате протекает при разрежении, то рабочим давлением является вакуум.

□ **Расчетное давление $P_{\text{рас}}$** – максимальное допускаемое рабочее давление, на которое производится расчет на прочность и устойчивость элементов аппарата при максимальной их температуре.

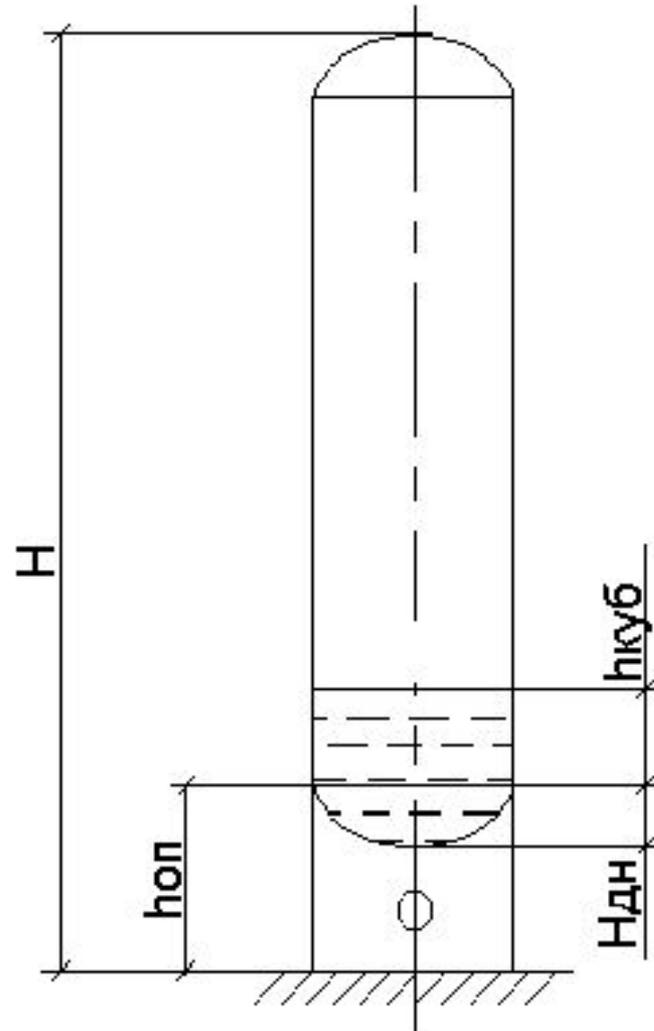
□ Для аппаратов, работающих под вакуумом, **расчетное наружное давление $p_{\text{рас}} = 0,1 \text{ МПа}$**

Расчетное давление для рабочих условий

$$\square P_{\text{рас}} = P_{\text{раб}} + P_{\text{г}}$$

$$\square P_{\text{г}} = \rho_{\text{р.ж.}} g h_{\text{р.ж.}}$$

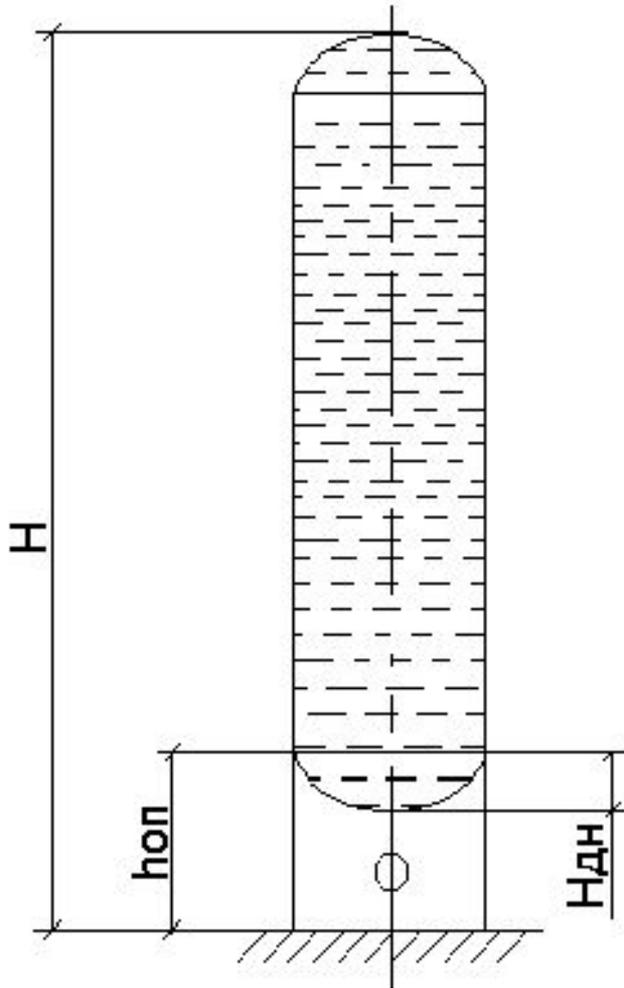
$$\square h_{\text{р.ж.}} = H_{\text{куб}} + H_{\text{дн}}$$



Рекомендуемые значения расчетного давления для некоторых сред

| Фракция/вещество | Рекомендуемое расчетное давление, не менее, МПа |
|---------------------------------------|---|
| C ₂ | 2,0 |
| C ₃ (всасывающая линия) | 1,6 |
| C ₃ (нагнетательная линия) | 2,0 |
| C ₄ | 0,6 |
| C ₅ | 0,3 |
| Аммиак | 1,6 |
| Фреон 12 | 1,0 |
| Сернистый ангидрид | 0,8 |
| Хлористый метил | 0,9 |
| Углекислый газ | 7,6 |

Расчетное давление для условий гидроиспытаний



$$\square P_{рас} = P_{пр} + P_{г}$$

$$\square P_{пр} = 1,25 P_{рас} [\sigma]_{20} / [\sigma]_t$$

$$\square P_{г} = \rho_{в} g h_{в}$$

$$\square h_{в} = (H - h_{оп}) + H_{дн}$$

Пробное давление

- **Пробное давление** $p_{пр}$ – избыточное давление, на которое аппарат испытывается на прочность и плотность после его изготовления и периодически при эксплуатации.

Пробные давления в сварных химических аппаратах (ОСТ 26 – 29194)

| $p_{рас}$ | $p_{пр}$, МПа |
|---------------------------------|---|
| Вакуум | $\max \{1,5 p_{рас} [\sigma]_{20} / [\sigma]_t; 0,2\}$ |
| Избыточное свыше 0 до 0,07 | 0,2 |
| $\geq 0,07$ до 0,5 | $\max \{1,5 p_{рас} [\sigma]_{20} / [\sigma]_t; 0,2\}^*$ |
| $\geq 0,5$ | $\max [1,25 p_{рас} [\sigma]_{20} [\sigma]_t; p_R + 0,3]^*$ |
| $\geq 0,07$ (для литых изделий) | $\max \{1,5 p_{рас} [\sigma]_{20} / [\sigma]_t; 0,3\}$ |
| Отсутствует | Налив воды |

Примечания: 1. Значение пробного гидравлического давления для аппаратов, работающих при минусовых температурах, принимается таким же, как при $t = 20$ °С.
 2. Отношение $[\sigma]_{20} / [\sigma]$ принимается для материала, применяемого в аппарате, для которого оно является наименьшим (обечайки, днища, аппаратные фланцы и их крепежные детали, патрубки и др.).

* При наружном давлении, если указанные значения требуют утолщения стенки, допускается.

Условное давление

Условное давление (номинальное) P_u (МПа) - избыточное рабочее давление при температуре элемента аппарата 20°C (без учета гидростатического давления).

- Характеризует то давление, которое выдержит изделие при 20 °С.
- Применяется для стандартизации изделий (например фланцев и т.д.)

Условные и рабочие давления для изделий из углеродистых сталей при различных температурах среды

| Условное давление, МПа | Наибольшее рабочие давления (в МПа) при температурах среды, °С | | | | | | |
|------------------------|--|------|------|------|------|------|------|
| | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 425 | 450 |
| 0.1 | 0.1 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | - |
| 0.25 | 0.25 | 0.22 | 0.2 | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.12 |
| 0.4 | 0.4 | 0.37 | 0.33 | 0.3 | 0.28 | 0.23 | 0.18 |
| 0.6 | 0.6 | 0.56 | 0.5 | 0.45 | 0.4 | 0.36 | 0.25 |
| 1 | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.64 | 0.56 | 0.4 |
| 1.6 | 1.6 | 1.4 | 1.25 | 1.1 | 1 | 0.9 | 0.64 |
| 2.5 | 2.5 | 2.2 | 2 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1 |
| 4 | 4 | 3.6 | 3.2 | 2.8 | 2.5 | 2.2 | 1.6 |
| 6.4 | 6.4 | 5.6 | 5 | 4.5 | 4 | 3.6 | 2.5 |
| 10 | 10 | 9 | 8 | 7.1 | 6.4 | 5.6 | 4 |

Допускаемое напряжение при расчете по предельным нагрузкам аппаратов, работающих при статических однократных нагрузках,

МПа

- для углеродистых и низкоуглеродистых сталей

$$[\sigma] = \eta \min \left\{ \frac{\sigma_T \text{ ИЛИ } \sigma_{T0,2}}{n_T}; \frac{\sigma_B}{n_B}; \frac{\sigma_{д10^5}}{n_D}; \frac{\sigma_{п.0/10^5}}{n_P} \right\}$$

Допускаемые напряжения для условий испытаний

- для углеродистых и низкоуглеродистых сталей

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T^{20} \text{ ИЛИ } \sigma_{T0,2}^{20}}{n_T}$$

где σ_T - минимальное значение предела текучести;

$\sigma_{T0,2}$ - минимальное значение условного предела текучести, при котором остаточное удлинение составляет 0,2%;

σ_T^{20} - минимальное значение предела текучести при температуре 20 °С;

$\sigma_{T0,2}^{20}$ – минимальное значение условного предела текучести при температуре 20°С, при которых остаточные удлинения составляет соответственно 0,2 %;

$\sigma_{д10^5}$ – среднее значение предела длительной прочности за 10^5 ч при расчетной температуре;

σ_B - минимальное значение временного сопротивления (предела прочности);

$\sigma_{п.0/10^5}$ - среднее значение 1 %-го предела ползучести за 10^5 ч

Значения коэффициентов запаса прочности в расчетах на прочность

| Условие нагружения | Коэффициент запаса прочности | | | |
|--------------------|------------------------------|-------|-------|-------|
| | n_T | n_B | n_D | n_P |
| Рабочие условия | 1,5 | 2,4 | 1,5 | 1,0 |
| Условия испытаний: | | | | |
| гидроиспытания | 1,1 | - | - | - |
| пневмоиспытания | 1,2 | - | - | - |
| Условия монтажа | 1,1 | - | - | - |

Коэффициент η

- **Поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям** должен быть равен единице, за исключением стальных отливок, для которых коэффициент η имеет следующие значения:
 - 0,8 – для отливок, подвергающихся индивидуальному контролю неразрушающими методами;
 - 0,7 – для остальных отливок.

Коэффициент прочности сварного шва

Коэффициентом прочности сварного шва ϕ называется отношение прочности шва к прочности основного материала. Коэффициент прочности сварного шва показывает, равна или меньше прочность сварного шва по отношению к прочности основного металла.

Коэффициент (ϕ) может изменяться от 0,6 до 1.

Если $\phi = 1$, то сварной шов **равнопрочен** основному металлу, если ϕ меньше 1, то прочность сварного шва меньше, чем прочность основного металла. В этом случае при расчете толщины стенки допустимое напряжение уменьшается пропорционально значению коэффициента прочности сварного шва, т.е. в формуле для расчета толщины стенки допустимое напряжение $[\sigma]$ умножается на коэффициент ϕ .

Коэффициент прочности сварного шва (ϕ) зависит от:

- **вида сварного шва и способа сварки** (таблица А.1) - стыковой или тавровой с двухсторонним сплошным проваром, выполняемый автоматической, полуавтоматической сваркой или вручную и т.д.
- **длины контролируемых швов в процентах от общей длины** (от 10 до 100 % от общей длины).

Способ выполнения сварного шва (выполняется автоматической, полуавтоматической или ручной сваркой) **определяется категорией аппарата, которая выбирается в зависимости от возможности транспортировать аппарат целиком или соответствующими частями с соединением сваркой или на фланцах на монтажной площадке.**

Длина контролируемых швов в % от общей длины сварных швов зависит от группы аппарата.

Группа аппарата

| Группа | Расчетное давление, МПа | Температура стенки, °С | Рабочая среда |
|--------|---------------------------------|--------------------------|--|
| 1 | Более 0,07 (0,7) | Независимо | Взрывоопасная или пожароопасная или 1-го, 2-го класса опасности |
| 2 | Более 0,07 (0,7) До 2,5 (25) | Выше 400 | Любая, за исключением указанной для 1-й группы сосудов |
| | Более 2,5 (25) До 5,0 (50) | Выше 200 | |
| | Более 5,0 (50) | Независимо | |
| | Более 4,0 (40) До 5,0 (50) | Ниже минус 40 | |
| 3 | Более 0,07 (0,7) До 1,6 (16) | Ниже 20 От 200 до 400 | |
| | Более 1,6 (16) До 2,5 (25) | До 400 | |
| | Более 2,5 (25) До 4,0 (40) | До 200 | |
| | Более 4,0 (40) До 5,0 (50) | От минус 40 до 200 | |
| 4 | Более 0,07 (0,7) До 1,6 (16) | От минус 20 до 200 | |
| 5а | До 0,07 (0,7) | Независимо | Взрывоопасная или пожароопасная или 1-го, 2-го, 3-го классов опасности |
| 5б | До 0,07 (0,7) | Независимо | Взрывобезопасная или пожаробезопасная или 4-го класса опасности |

Объем контроля сварных соединений

Стальные сварные аппараты, в зависимости от расчетного давления, температуры стенки (расчетной температуры) и свойств рабочей среды (взрывоопасная или пожароопасная или 1-го, 2-го опасности, взрывобезопасная или пожаробезопасная или 4-го класса опасности и т.д.) подразделяются на **пять групп**. Пятая группа в свою очередь подразделяется на группы 5а и 5б . Сосуды, работающие под вакуумом или без давления (под наливом), независимо от расчетного давления следует отнести к группе 5а или 5б.

Длина контролируемых швов для аппаратов 1-й группы – 100 % всех сварных швов; 2-й и 3-й группы – 50%; 4-й группы – 25%; для остальных – 10%.

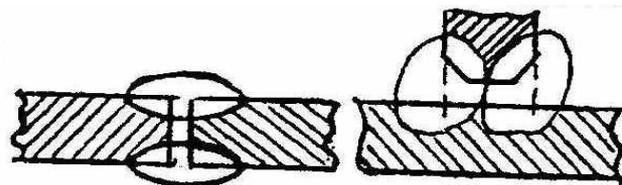
| Группа аппарата | Объем контроля сварных соединений, % |
|-----------------|--------------------------------------|
| 1, 2 | 100 |
| 3 | 50 |
| 4, 5а | 25 |
| 5б | 10 |

Категории аппаратов

К перевозке по железной дороге целиком в зависимости от категории допускаются аппараты, имеющие значения массы, диаметра и длины, не превышающие, указанные в таблице.

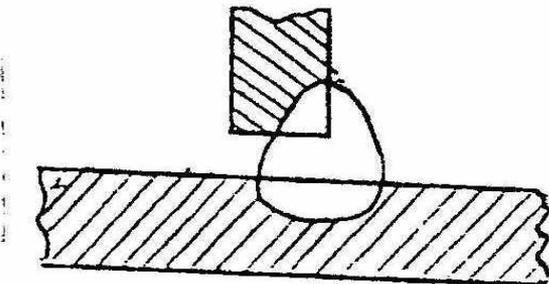
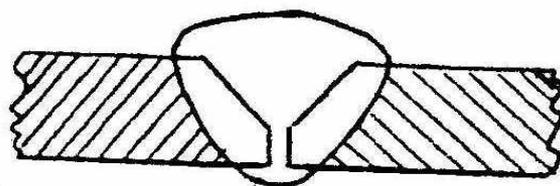
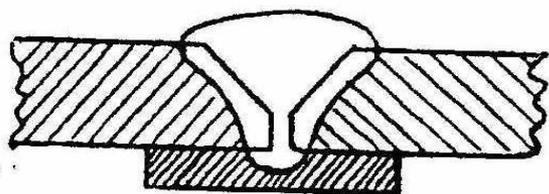
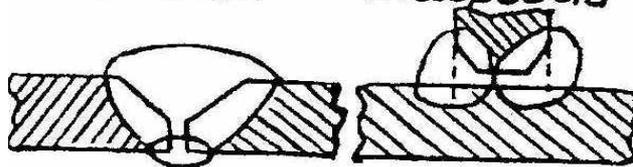
- Если аппарат допускается к перевозке по железной дороге целиком, то применяется стыковой или тавровый шов с двухсторонним сплошным проваром, выполняемый автоматической сваркой.
- В случае, если хотя бы одно из значений m , D или L будет большим, чем указано в таблице, аппарат должен транспортироваться по железной дороге соответствующими частями. В этом случае обычно шов стыковой с подваркой корня шва или тавровый с двухсторонним сплошным проваром, выполняемый вручную.

| Категория | m , кг | D , мм | L , м |
|-----------|----------|----------|---------|
| 1 | 120000 | 3200 | 48 |
| 2 | 120000 | 3800 | 37 |
| 3 | 120000 | 4000 | 21 |
| 4 | 240000 | 3900 | 22 |
| 5 | 400000 | 4380 | 11 |



стыковой

тавровый



Значения коэффициента прочности сварных швов

| Вид сварного шва и способ сварки | Коэффициент прочности сварных швов для стальных сосудов и аппаратов | | Вид сварочного шва и способ сварки | Коэффициент прочности сварных швов для стальных сосудов и аппаратов | |
|---|---|--|--|---|--|
| | Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100%* | Длина контролируемых швов от общей длины составляет от 10 до 50 %* | | Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100%* | Длина контролируемых швов от общей длины составляет от 10 до 50 %* |
| Стыковой или тавровый с двусторонним сплошным проваром, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой | 1,0 | 0,9 | Втавр, с конструктивным зазором свариваемых деталей | 0,8 | 0,65 |
| Стыковой с подваркой корня шва или тавровый с двусторонним сплошным проваром, выполняемый вручную | 1,0 | 0,9 | Стыковой, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой с одной стороны с флюсовой или керамической подкладкой | 0,9 | 0,8 |
| Стыковой, доступный сварке только с одной стороны и имеющий в процессе сварки металлическую подкладку со стороны корня шва, прилегающую по всей длине шва к основному металлу | 0,9 | 0,8 | Стыковой, выполняемый вручную с одной стороны | 0,9 | 0,65 |

* Объем контроля определяется техническими требованиями на изготовление