

# ТОЖНАДЗОР

№7 (92) июль 2014 года



*Андрей РУЛЬ,  
генеральный директор ООО «ЭлитСтройГрупп»:*

**«Вместе мы – команда профессионалов, делающих все для того, чтобы возводимые нами объекты оставались актуальными как можно дольше»**

*стр. 38*

# Практический опыт укрепления оболочечных конструкций

Продление остаточного ресурса изношенных оболочечных конструкций. Практика укрепления стенок стальных вертикальных резервуаров и дымовых труб

Дмитрий ЛАВРЕНТЬЕВ,  
заместитель директора по экспертизе – главный инженер  
ООО «Производственно-технический центр» (г. Уфа)

**В практике проведения экспертиз промышленной безопасности встречаются ситуации, когда результаты обследования показывают, что техническое устройство находится в работоспособном, но близком к критическому состоянию по причине его коррозионно-эрозионного износа, что не позволяет продлить срок безопасной эксплуатации на период межремонтных интервалов, составляющих на многих предприятиях четыре года.**

Предприятие, на котором эксплуатируется данное техническое устройство, не всегда имеет возможность провести незапланированный восстановительный ремонт. В данной ситуации эксперт может выдать положительное заключение и продлить срок безопасной эксплуатации технического устройства при условии выполнения мероприятий по снижению рабочих параметров и дополнительному мониторингу оборудования, что ведет к снижению эффективности производства. Эффективным выходом из создавшейся ситуации служит разработка рекомендаций по усилению конструкций с целью увеличения их несущей способности, причем усиление конструкций в некоторых

случаях можно выполнить без вывода из эксплуатации технического устройства. Например, можно произвести бандажирование конструкции, предварительно изготовив бандаж на ремонтной базе, и смонтировать его без проведения сварочных работ с применением разъемных соединений. Во многих случаях технология усиления конструкций более проста и экономична по сравнению с работами по восстановлению конструкций. Усиление конструкции может быть как временной мерой поддержания технического устройства в работоспособном состоянии до проведения восстановительного ремонта, так и мерой долговременного продления остаточного ресурса, при работе оборудования в условиях

медленного протекания коррозионно-эрозионных процессов.

Одним из видов усиления конструкций является укрепление оболочек ребрами жесткости. Укрепленные ребрами жесткости тонкие оболочки широко применяются в современной технике, так как при обеспечении равнопрочности выигрывают в экономии металла по сравнению с толстостенными оболочками. Общеизвестными примерами могут служить корпуса кораблей, самолетов, космических аппаратов, кузова автомобилей, где ребра жесткости называются шпангоутами, стрингерами и лонжеронами.

Для технических устройств, применяемых на опасных производственных объектах и содержащих в своей конструкции оболочки, возможна разработка и выполнение мероприятий по продлению срока службы (теоретически до 20 лет) с укреплением стенки ребрами жесткости или бандажированием, то есть укреплением оболочки за счет стягивания поясами (бандажирование является частным случаем укрепления оболочек вращения, предусматривающим создание в оболочке предварительных разгружающих напряжений).

Таковыми укрепляемыми конструкциями могут быть, например: стенки стальных вертикальных и горизонтальных резервуаров, обечайки емкостного оборудования, кожухи цилиндрических трубчатых печей, сосуды, работающие при давлении ниже 0,07 МПа, ме-

таллические дымовые трубы, корпуса печей дожига и топок-подогревателей установки сероочистки, топки котлоутилизаторов, а также стволы и головки факелов.

Укрепление стенок сосудов и резервуаров ребрами жесткости рекомендуют следующие нормативные документы:

- СТО СА 03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов»;
- СА-03-008-08 «Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности»;
- СТО 0030-2004 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Правила технического диагностирования, ремонта и реконструкции»;
- ГОСТ Р 52857.2-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек»;
- ГОСТ Р 52857.5-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок».

В приведенных нормативных документах содержатся рекомендации и методики расчетов укрепления оболочек только кольцевыми ребрами жесткости. В п. п. 6.2.4.2. СТО 0030-2004 также сказано, что «при возможной расчетной потере устойчивости стенки могут устанавливаться горизонтальные кольца жесткости или вертикальные ребра жесткости, либо одновременно те и другие, в зависимости от факторов, вызывающих потерю устойчивости», но при этом отсутствуют методика расчетов и рекомендации по монтажу меридиональных ребер жесткости (поэтому

расчеты укрепления стенки с учетом установки меридиональных ребер пришлось искать в литературе по проектированию лонжеронных и стрингерных отсеков корпусов ракет).

Способ укрепления стенок ребрами жесткости выбирается в зависимости от условий нагружения оболочек и расположения мест износа (рис. 1, 2, 3, 3а, 3б, 4).

Рассмотрим укрепление оболочки вращения только кольцевыми ребрами (рис. 4). При укреплении только кольцевыми ребрами жесткости повышение несущей способности оболочки производится за счет ее разделения на несколько более коротких оболочек, поскольку с уменьшением длины оболочки ее изгибная жесткость увеличивается. При этом кольцевые ребра должны обеспечивать общую и местную устойчивость при действии изгибающего момента в плоскости кольца (от ветровых, весовых нагрузок и действия вакуума). Гибкие кольцевые ребра (бандажи) могут устанавливаться при действии осесимметричных радиальных нагрузок от внутреннего давления. При значительных осевых сжимающих нагрузках, близких к критическим значениям, укрепление кольцевыми ребрами становится нецелесообразным (так как обеспечение устойчивости оболочки, расположенной между ребрами, вызывает необходимость слишком частой их установки). Например, для вертикальных цилиндрических резервуаров, согласно СА-03-008-08, при отношении меридионального напряжения к его критическому значению

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{01}} \geq 0,8,$$

установка кольцевых ребер жесткости не рекомендуется.

При укреплении только меридиональными ребрами (рис. 1) повышение не-

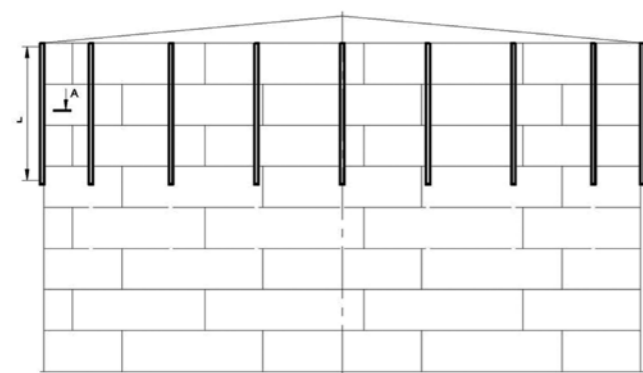


Рис. 1. Укрепление верхних изношенных поясов стенки резервуара меридиональными ребрами жесткости

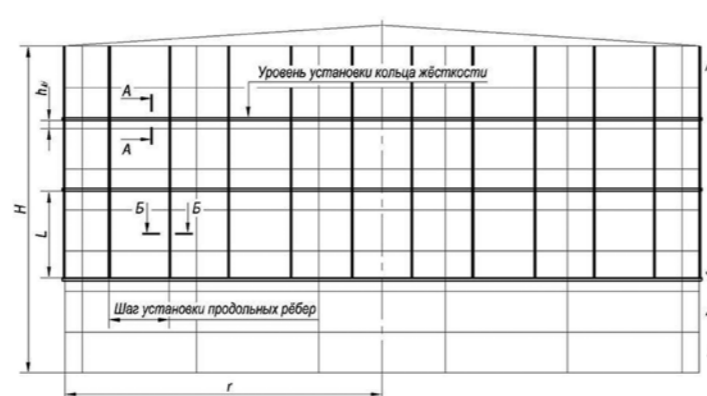


Рис. 2. Комбинированное укрепление изношенной стенки резервуара меридиональными и кольцевыми ребрами жесткости

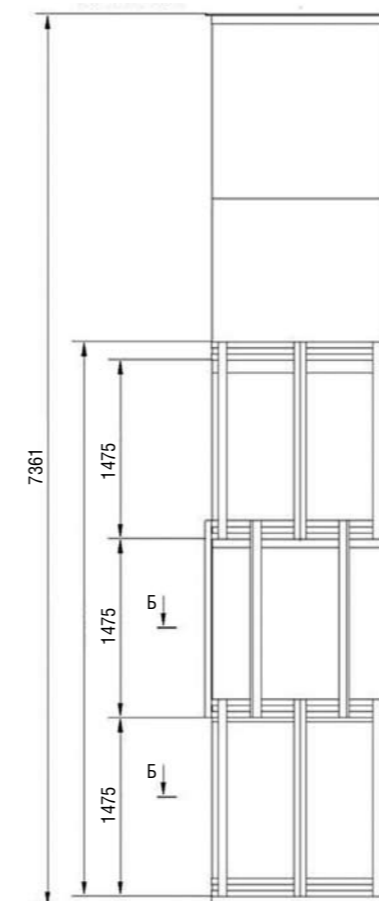


Рис. 3а. Укрепление дымовых труб бандажными поясами

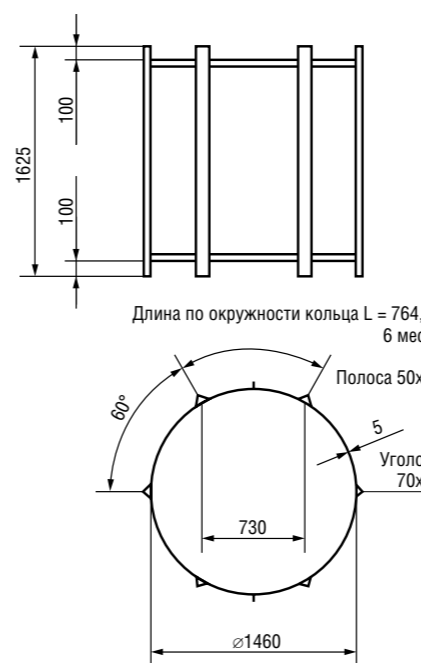


Рис. 3б. Бандажный пояс

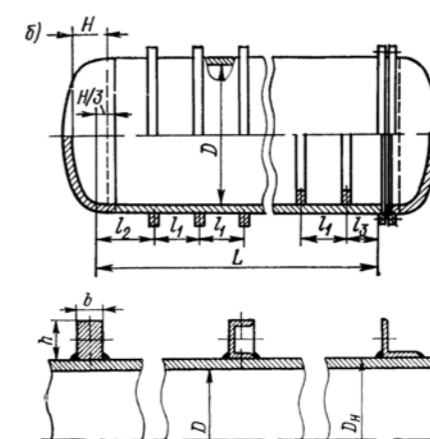


Рис. 4. Цилиндрическая обечайка, подкрепленная кольцами жесткости

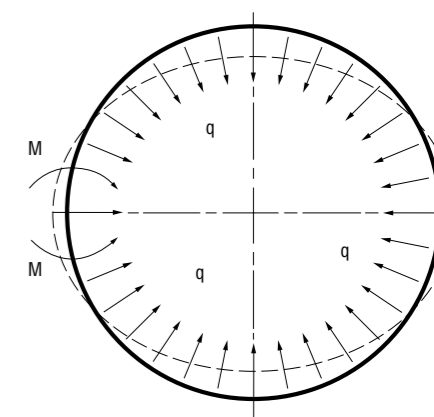


Рис. 5. Расчетная схема кольцевого ребра жесткости

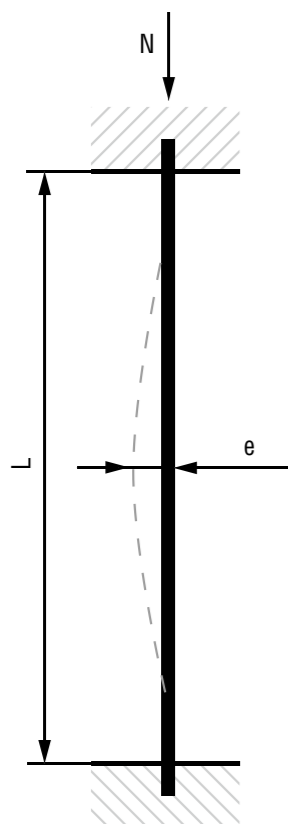


Рис. 6. Расчетная схема меридионального ребра жесткости

сушей способности оболочки производится за счет частичного переноса осевой нагрузки на ребра жесткости. Способность ребер нести осевые сжимающие нагрузки ограничивается их длиной, что вытекает из общеизвестной формулы Эйлера, которая показывает, что критическая осевая сила потери устойчивости обратно пропорциональна квадрату приведенной длины ребра. Установка длинных меридиональных ребер возможна только при значительном увеличении их поперечного сечения.

Из сказанного следует, что укрепление оболочек вращения, нагруженных значительной сжимающей осевой силой, наиболее целесообразно производить комбинированным способом, с установкой жестких кольцевых ребер и коротких меридиональных ребер.

Перейдем к порядку расчетов укрепления резервуара РВС. Расчетные схемы укрепления резервуара (рис 5, 6).

Расчеты проводятся в следующем порядке: сначала определяются уровни установки кольцевых ребер жесткости согласно рекомендациям СТО СА 03-002-2009, СА-03-008-08 из условия, что отношение меридионального на-

пряжения к его критическому значению меньше 0,8

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{кр1}} < 0,8.$$

Далее подбирается поперечное сечение кольца, которое обеспечивает прочность и устойчивость ребра при действии аварийного вакуума и ветровой нагрузки. Причем при расчете момента инерции в поперечное сечение включается часть стенки резервуара, непосредственно прилегающая к кольцевому ребру. Затем производится расчет на устойчивость каждой цилиндрической части резервуара, заключенной между кольцевыми ребрами. Если условие устойчивости не соблюдается для какой-либо из частей, то выполняется подбор поперечного сечения и шага установки меридиональных ребер жесткости. Минимальный шаг установки меридиональных ребер определяется из условия обеспечения устойчивости цилиндрической панели, заключенной между ребрами жесткости. Осевая нагрузка на ребра жесткости определяется как разница между расчетной осевой нагрузкой и нагрузкой, при которой выполняется условие устойчивости стенки резервуара. При этом должно выполняться условие ра-

Предельные отбраковочные толщины

Номер пояса	1	2	3	4	5	6	7	8
Предельная нормативная толщина, мм	7,8	6,8	5,9	4,8	3,8	2,7	2,0	2,0
Расчетная толщина, мм	6,1	5,0	4,0	3,4	2,5	1,8	1,1	0,5

венства осевых перемещений стенки резервуара и ребер жесткости. Важно как можно точнее определить величину совместных осевых перемещений стенки и ребер, так как от этого зависит складываемый запас жесткости ребер и, следовательно, их металлоемкость.

Осевое перемещение ребра жесткости определяется по приближенной формуле, моделирующей деформацию, показанную на рисунке 6. Осевое перемещение стенки резервуара определяется по осесимметричной математической модели деформации стенки.

Поперечное сечение меридионального ребра жесткости подбирается из условий прочности и устойчивости по СНиП II-23-81\*, с учетом начального прогиба ребра, который устанавливается по государственным стандартам, регламентирующим предельные отклонения фасонного проката. Например, для уголкового профиля по ГОСТ 8509-93 стрела прогиба не должна превышать 0,4% длины.

На рисунках 7 и 8 показано конструктивное решение укрепления резервуара типа РВС ребрами жесткости.

Закрепление меридиональных ребер по концам обеспечивает раздельную деформацию стенки и меридиональных ребер в соответствии с расчетной схемой и отсутствие поперечных сил от вакуума, действующих на меридиональное ребро жесткости.

Рекомендации по установке кольцевых ребер изложены в ГОСТ 31385-2008 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия».

На рисунке 9 показан резервуар РВС-

5000, потерявший устойчивость при проведении его испытания наливом воды. При заполнении резервуара водой появилась вмятина на 5-8 поясах стенки.

На рисунках 10а, 10б показан тот же резервуар после комбинированного укрепления стенки.

Практика проведения обследований резервуаров для хранения нефтепродуктов показывает, что скорость коррозионного износа их стенок, как правило, не превышает 0,05...0,07 мм/год.

В таблице приведены предельные (отбраковочные) толщины для РВС-5000 согласно «Правилам технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту» (Москва, «Недра», 1988) и «Правилам технической эксплуатации резервуаров» ОАО СКБ «Транснефтеавтоматика», утвержденным ОАО «НК «Роснефть» 28 января 2004 года, и толщины, рассчитанные из условия прочности.

Как видно из таблицы, разница между толщиной, обеспечивающей прочность стенки, и толщиной стенки, обеспечивающей ее устойчивость, составляет от 0,9 до 1,9 мм.

Нетрудно посчитать, что если произвести укрепление стенки ребрами жесткости, обеспечив тем самым ее устойчивость, то можно эксплуатировать резервуар до предельной толщины потери прочности, и тогда остаточный ресурс резервуара может продлиться от  $T = 0,9 / 0,07 = 12,8$  лет до  $T = 0,9 / 0,05 = 18$  лет.

Далее хочу подчеркнуть, что при применении метода ремонта с укреплением ребрами жесткости значительно сокращаются материальные и трудовые

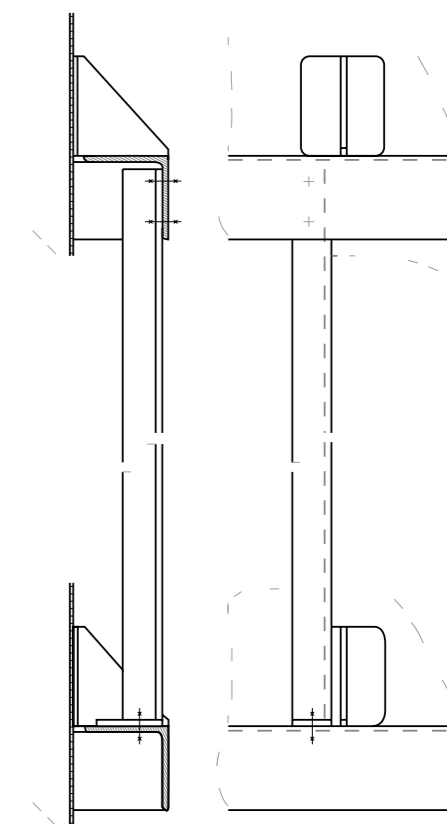


Рис. 8. Конструктивное исполнение меридионального ребра жесткости для РВС

затраты, а также упрощается технология ремонта (нет необходимости производить подгонку геометрической формы заменяемых участков оболочки). Например, при укреплении поясов стенки РВС-5000 ребрами вместо их замены имеет место четырехкратная экономия металла верхних поясов и восьмикратная экономия металла нижних поясов стенки, а также сокращение сварочных работ, общая протяженность сварных швов сокращается более чем в 4 раза.

В настоящее время на предприятиях АНК «Башнефть» эксплуатируются более десятка резервуаров и две дымовые трубы, отремонтированные с применением укрепления стенок.

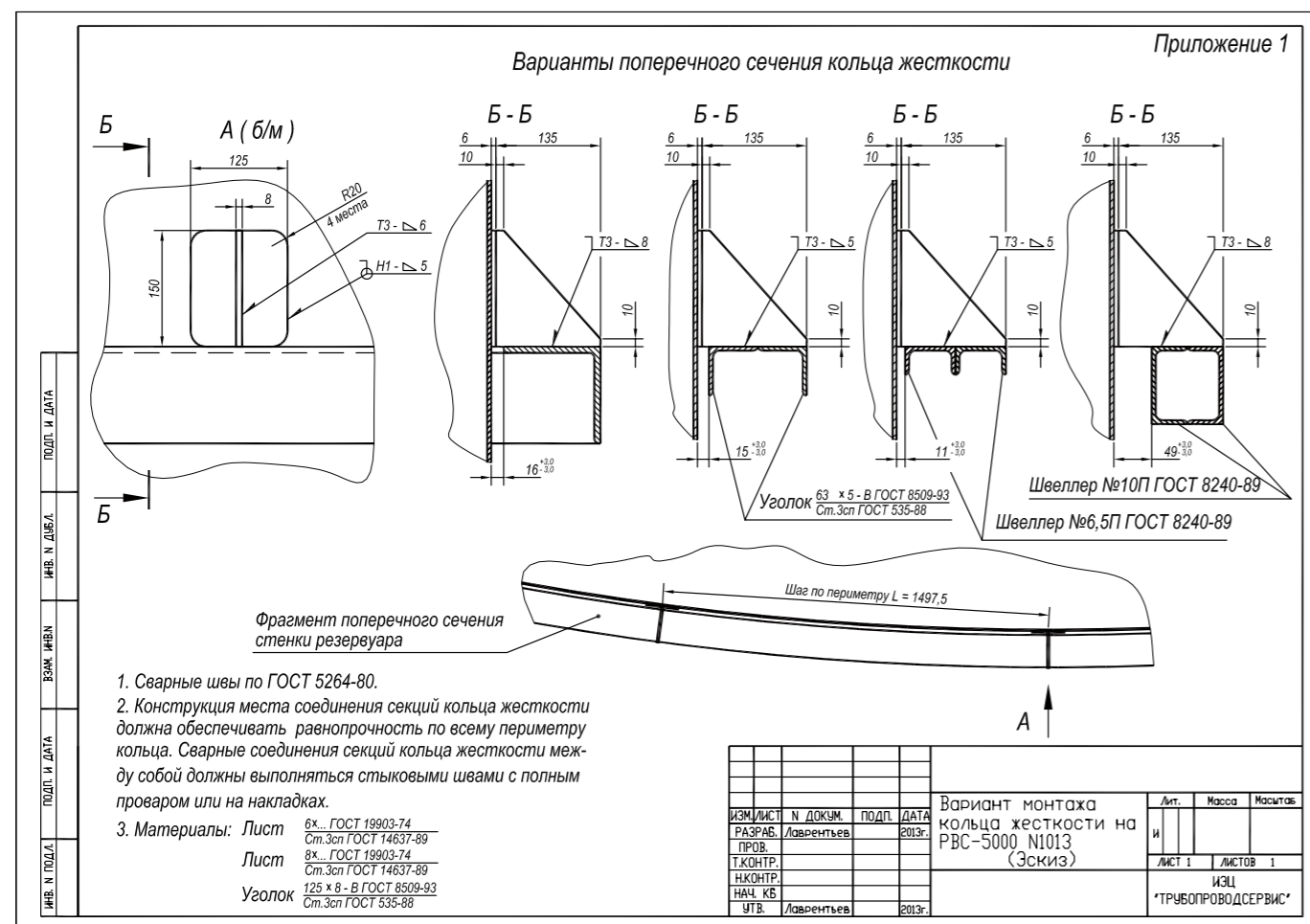


Рис. 7. Конструктивное исполнение кольцевых ребер для РВС



Рис. 9. РВС-5000 до укрепления стенки



Рис. 10а, рис. 10б. РВС-5000 после комбинированного укрепления стенки

