

# ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ МОНТАЖНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕ- НИЙ СТЕНКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ, ПОСТРОЕННЫХ ИЗ РУЛОНИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК

**Ю. П. БАРВИНКО, В. М. ГОЛИНЬКО**, кандидаты техн. наук, **А. Ю. БАРВИНКО**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

**А. В. ПЕРЕЛЬМУТЕР**, д-р техн. наук (Укр. ин-т исследований окружающей среды и ресурсов, г. Киев),

**Г. В. КУЛЕБА**, инж. (ГАО «Приднепров. магистральные нефтепроводы», г. Кременчуг)

Приведен анализ различных способов выполнения вертикальных монтажных стыков стенки резервуаров, сооружаемых из рулонированных заготовок. Предложено при ремонте монтажных стыков существующих резервуаров и строительстве новых стык выполнять путем сварки специальных листов-вставок. Дана теоретическая оценка локальных напряжений в стенке резервуара после сварки вставок с учетом фактических радиальных деформаций стенки.

*Ключевые слова:* стальные резервуары, рулонированные заготовки, вертикальные монтажные стыки стенки, угловые деформации, концевые участки стенки, вставки, кольцевые напряжения

Качество и работоспособность вертикальных монтажных сварных соединений стенки резервуаров, сооруженных из рулонированных заготовок, неразрывно связаны с развитием и совершенствованием собственно способа строительства. Способ рулонирования, предложенный в 1944 г. доктором технических наук Г. В. Раевским в ИЭС им. Е. О. Патона [1], с 1950 г. успешно применялся при строительстве резервуаров вместимостью 100...5000 м<sup>3</sup> с толщиной стенки до 10 мм включительно. Стенки изготавливали на заводе в виде одного полотнища, сваренного из отдельных листов двусторонней автоматической сваркой. При монтаже стенки выполняли только работы по разворачиванию рулона, подгонке и сварке одного вертикального монтажного стыка. Этот способ строительства резервуаров стал шагом вперед в повышении качества сварных соединений, сокращении сроков их строительства, уменьшении их стоимости и хорошо отвечал потребностям послевоенного времени [2]. Эта технология прошла испытание временем и в настоящее время широко применяется в Украине и России.

Последующее освоение технологии сооружения резервуаров вместимостью 10, 20, 30 и 50 тыс. м<sup>3</sup> из рулонированных заготовок потребовало создания производственных мощностей, способных изготавливать рулоны из сталей повышенной и высокой прочности (толщина листов до 17 мм), и разработки специальных технологий по сборке и сварке монтажных стыков. Получение качественных монтажных стыков стало определяющей технологической операцией при строительстве таких резервуаров [3].

Формообразование концевых участков стенки, их сборка и сварка в стык на площадке совмещенного в одну линию вертикального стыка резервуаров вместимостью до 5 тыс. м<sup>3</sup> включительно были

успешно освоены специализированными монтажными организациями. Это позволило в кратчайшие сроки перейти к применению только стыковых соединений.

При монтаже резервуаров большей вместимости с толщиной нижнего пояса стенки 12...17 мм из стали марок 09Г2С и 16Г2АФ все актуальнее становится проблема соответствия надежности вертикальных монтажных стыков стенки аналогичным заводским стыкам. Результаты технического диагностирования вертикальных монтажных стыковых швов стенки в резервуарах вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup>, построенных из рулонированных заготовок с толщиной нижнего пояса стенки 16 мм из стали 09Г2С, показали их низкое качество. Это проявилось в наличии недопустимо больших угловых деформаций и значительном смещении кромок, что в условиях малоциклового нагружения стенки резко снижало работоспособность резервуаров [4]. При этом действующая нормативная документация [5] на строительство резервуаров не содержала непосредственного нормирования угловых деформаций. Косвенно угловые деформации ограничивались допусками на отклонения стенки резервуара от вертикали. В определенном смысле это явилось следствием монопольного положения рулонного способа изготовления резервуаров при отсутствии альтернативы в виде сооружения стенки из отдельных листов. При наличии специализированных заводов, оборудованных высокопроизводительными станками для изготовления рулонированных заготовок [2], одновременное введение более жестких требований к монтажным стыкам стенки резервуаров вместимостью 10 тыс. м<sup>3</sup> и более означало бы приостановление на определенное время всей индустрии резервуаростроения. Поэтому процесс повышения качества монтажных стыков принял затяжной поэтапный характер, вследствие чего часть построенных емкостей имела стыки весьма низкого качества. Со временем это стало причиной аварийного состояния резервуаров, работавших в режиме ин-



тенсивного (регулярный 1...2 раза в сутки слив-налив) малоциклового нагружения [6].

**Анализ существующих конструкций вертикальных монтажных стыков.** Практика показала, что разработка технологии, которая позволяла бы получать геометрическую форму стенки толщиной более 12 мм на участке совмещенного в одну линию монтажного стыка, соответствующую требованиям зарубежных стандартов [7], является сложной задачей, поиски оптимального решения которой ведут многие организации [8] уже более 20 лет. В качестве временного решения была разработана специальная инструкция по усилению стыков стенок резервуаров РВС-20 с дефектами, допускавшая эксплуатацию емкостей с угловыми деформациями [4]. В зависимости от значений угловых деформаций, определяемых отклонением стенки резервуара от проектной формы на базе 500 мм, предлагалось устанавливать на части длины стыка специальные горизонтальные ребра жесткости, уменьшающие напряженное состояние сварных соединений.

Другое решение вопроса безопасной эксплуатации резервуаров со значительными угловыми деформациями в монтажных стыках может быть связан с дифференцированным подходом к количеству циклов их нагружения, т. е. основываться на увязке «угловатости» с допускаемым количеством циклов слив-налив резервуара в процессе последующей его эксплуатации. Такая работа была выполнена в ИЭС им. Е. О. Патона с использованием специальных образцов [9, 10]. Результатом ее стало введение в нормативные документы [11] таблицы, где указывается количество допускаемых циклов нагружения стенки в зависимости от угловой деформации сварного соединения, марки стали и толщины листов. Приведенная в таблице зависимость позволяет дать оценку долговечности рассматриваемых стыков вновь строящихся резервуаров и определить остаточный ресурс резервуаров, находившихся определенное время в эксплуатации. Испытания также подтвердили, что при соблюдении требований к угловым деформациям в сварном соединении и смещением кромок, допускаемым нормами [7], появления в них усталостной трещины при малоцикловом нагружении происходит при количестве циклов не менее  $5 \cdot 10^4$ , т. е. фактически обеспечивается работоспособность стыков в течение всего технического срока службы резервуаров. Вопрос о том, как исправлять дефекты вертикальных стыков стенки после отработки ими допускаемого количества циклов нагружения не рассматривался.

Между тем, интенсивное появление трещин в вертикальных монтажных стыках стенок рассматриваемых резервуаров после 15...20 лет эксплуатации [12] потребовало поиска новых технологий как для повышения качества стыков на вновь строящихся резервуарах, так и для восстановления работоспособности стыков с образовавшимися трещинами.

Для улучшения качества монтажных стыков на вновь строящихся резервуарах была разработана специальная технология их выполнения [13]. В соответствии с ней перед сваркой концевым участкам соединяемых рулонов с помощью специальных фор-

мообразователей придается геометрическая форма, близкая к проектной. Формообразователи крепятся к шахтной лестнице, на которую было намотано полотнище. После закрепления к ним по всей высоте кромок стенки с помощью последующего вращения шахтной лестницы концевым участкам придается требуемая кривизна. Практика показывает, что применение разработанной технологии не гарантирует получение стабильных результатов по обеспечению концевыми участками требуемой формы. Это обусловлено различием толщины стенки по поясам и большой податливостью полотнища.

С учетом отмеченных недостатков была предложена технология с жесткой системой пуансон-матрица [14], согласно которой формообразование выполнялось по очереди на каждом поясе стенки. Пуансон имел гидравлический привод от специальной маслостанции. Во время работы все устройство перемещалось краном на заданный пояс. Технология была рассчитана на многократное применение устройства. Учитывая, что резервуары являются единичными объектами, работы с системой пуансон-матрица ограничились экспериментами на нескольких резервуарах.

Другим направлением поисков улучшения геометрической формы вертикального монтажного стыка является изменение конструкции концевых участков полотнища. Как один из вариантов предлагается делать стык не совмещенным, а «вразбежку» по поясам. Изготовление концевых участков полотнищ в виде «гребенок» (с противоположно расположенными выступами и впадинами) и последующее их соединение на монтаже [14] должно было полностью исключить все недостатки, присущие типовому решению стыка, который совмещен в поясах по одной вертикали. При использовании указанного способа в каждом стыке приходится соединять начало одного и конец другого рулона. Если масса рулона составляет до 60 т, то на месте его установки на днище для последующего разворачивания всегда будет наблюдаться определенная просадка основания. Это обстоятельство в сочетании с наличием деформаций в сварных полотнищах высотой до 18 м создает трудности для точной подгонки под сварку листов «гребенки» и вынуждает уменьшить разбежку стыков до 200...300 мм. В настоящее время в России способ «гребенка» нашел применение при сооружении резервуаров большой емкости.

В ИЭС им. Е. О. Патона разрабатывается более универсальный, на наш взгляд, способ выполнения вертикальных монтажных стыков путем сварки специальных листов-вставок (рис. 1), обеспечивающий требуемое качество. Предполагается, что такое решение монтажного стыка будет приемлемо прежде всего для ремонта эксплуатируемых, а впоследствии и для вновь строящихся резервуаров из рулонированных заготовок. Высота вставок должна быть равной высоте пояса (за исключением первой снизу). Чередование вставок различной высоты позволяет получать вертикальный шов «вразбежку» по поясам по всей высоте стенки. При необходимости вставки нескольких поясов могут укрупняться в одну карту.



Рис. 1. Общий вид участка стенки резервуара вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup> со специальными вставками вместо монтажного стыка в одну линию

**Особенности технологии ремонта стыков, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона.**

Вварка вставок является сложной технологической задачей. Так, в резервуарах, построенных листовым способом, каждому листу с помощью вальцовки придается проектная кривизну стенки. Стенка же резервуара, полученная путем принудительного разворачивания полотна рулона на проектный радиус с последующим его закреплением внизу и вверху к жестким дискам, в процессе эксплуатации постоянно находится в состоянии предварительного напряжения (рис. 2) в связи с действием внутренних уравновешенных изгибающих моментов. Если в такой стенке вырезать проем для вставки, то образовавшиеся свободные кромки под действием моментов начнут перемещаться внутрь резервуара. Следовательно, перед сваркой каждой вставки сначала необходимо по всей длине вырезанного проема придать кромке проектное положение, а затем подогнать к ней вставку.

При вварке вставок следует учитывать предварительное напряжение стенки моментами  $M_1$ ,  $M_2$ , а также применять специальную технологию сварки вставок в «жесткий» контур. Как видно из рис. 1, при монтаже каждой вставки выполняется два вертикальных шва и один горизонтальный. При проектных толщинах поясов стенки поперечная усадка каждого шва в процессе сварки (по данным замеров) составляет 1,5... 2,0 мм. Если не предпринимать специальных мер, то компенсация поперечной усадки произойдет за счет увеличения кривизны прилегающих участков стенки с образованием недопустимых впадин (вмятин). Следовательно, длину вставки следует назначать с учетом поперечной усадки (деформации) вертикальных швов. Направление продольной усадки вертикальных швов лежит в плоскости максимальной жесткости стенки и не вызывает заметных ее деформаций. Появление

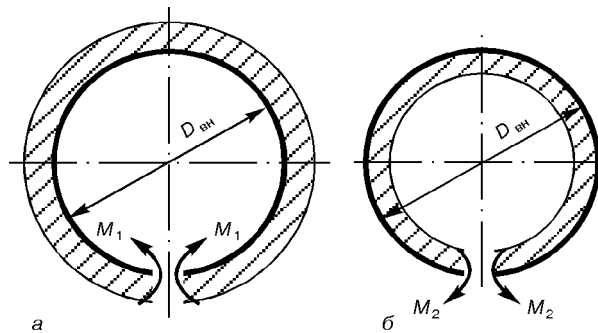


Рис. 2. Схема предварительного напряжения стенки резервуара при  $R_{ост} > R_{пр}$  (а) и  $R_{ост} < R_{пр}$  (б);  $R_{ост}$  — остаточный радиус кривизны рулонированной заготовки;  $R_{пр}$  — проектный радиус стенки резервуара;  $D_{вн}$  — внутренний диаметр резервуара

на стенке вогнутости является следствием поперечных и продольных деформаций горизонтальных сварных соединений при остывании металла шва. Для уменьшения сварочных деформаций от горизонтальных швов применяются специальные технологии сварки и конструктивные решения.

Все приведенные выше факты были учтены при разработке в ИЭС им. Е. О. Патона новой технологии ремонта вертикальных стыков стенки. Предполагается, что после ремонта монтажный стык в одну линию будет заменен на рядовое стыковое соединение стенки с расположением вертикального стыка «вразбежку» по всей высоте поясов. При этом местные отклонения стенки в области стыка будут удовлетворять требованиям нормативных документов, действующих в Украине [15].

С использованием разработанной технологии в 1999 г. был выполнен ремонт трех монтажных стыков стенки резервуара № 4 вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup> в НПС «Снигиревка» (рис. 1). Анализ деформаций стенки в процессе ремонта и после его окончания показал, что при фактическом отсутствии угловых деформаций и смещений кромок стыка цилиндрическая поверхность вваренных вставок не всегда вписывается в проектную форму стенки в пределах допусков действующих нормативных документов. Выявили, что и требования действующих норм не учитывают полностью особенности технологии ремонта и не позволяют в достаточной степени контролировать их геометрическую форму. Замеры показали, что местные деформации стенки в области вставок надо оценивать не только по размерам зазора между горизонтальным шаблоном или вертикальной рейкой и стенкой, но и по отклонению  $\Delta f$  (на уровне горизонтальных швов и посередине листа) фактического значения стрелки кривизны  $f$  от расчетного, с учетом проектного радиуса резервуара, определяемого значением  $\Delta f$  (рис. 3). Если найти для рассматриваемых участков стенки зависимость  $\Delta f$  от кольцевых напряжений  $\sigma_k$ , то можно ввести допусковые значения  $\Delta f$ , при которых будет удовлетворяться условие  $\sigma_{к.м} < \sigma_T$  ( $\sigma_{к.м}$  — значения кольцевых напряжения с учетом местных отклонений геометрической формы стенки от проектной;  $\sigma_T$  — нормативный предел текучести листового проката стенки рассматриваемого пояса).

Критерий  $\sigma_{к.м} < \sigma_T$  можно принять с учетом того, что в процессе налива продукта для хранения в ре-

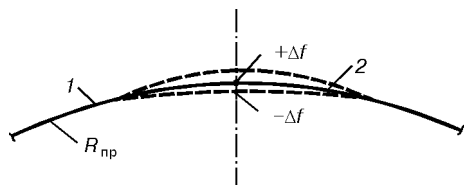


Рис. 3. Возможные положения листов-вставок после сварки: 1 — проектное положение стенки резервуара; 2 — лист-вставка

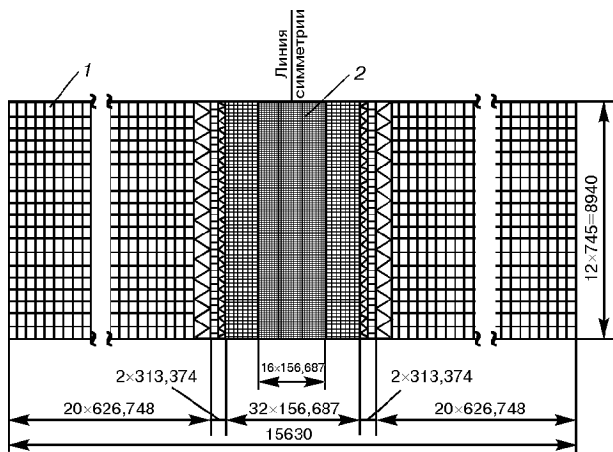


Рис. 4. Схема конечных элементов участков стенки 1 и 2 (область усиления выделена)

резервуаре его стенка постепенно приобретает проектную форму и значения  $\Delta f$  стремятся к нулю.

Такие допуски при монтаже вставок будут давать определенные гарантии работоспособности резервуара в процессе эксплуатации. Естественно, что с накоплением опыта эксплуатации резервуаров вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup> после ремонта и усовершенствованием технологии их ремонта значения  $\Delta f$  будут еще уточняться.

**Теоретическая оценка локальных напряжений в стенке резервуара после сварки вставок.** Искомая зависимость  $\Delta f$  была получена путем привлечения универсального программно-вычислительного комплекса SCAD, дополненного процедурой учета начальных геометрических несовершенств модели. Необходимые исходные данные взяты из замеров, выполненных в процессе ремонта трех вертикальных монтажных стыков упомянутого выше резервуара № 4 в НПС «Снигиревка». Диаметр этого резервуара составлял 39,9 м, высота стенки — 18 м. Расчетная схема резервуара определялась конечно-элементной моделью стенки и способом задания ее геометрической формы.

В силу симметрии конструкции расчет выполнен для четверти резервуара, при этом рассматривались

Таблица 1. Толщина листов-вставок для различных поясов стенки

| Номер пояса | Стенка, мм | Усиление (вставка), мм |
|-------------|------------|------------------------|
| I           | 16         | 16                     |
| II          | 15         | 16                     |
| III         | 14         | 16                     |
| IV          | 12         | 14                     |
| V           | 11         | 12                     |
| VI          | 10         | 12                     |

Таблица 2. Отклонение стрелки кривизны  $f$  от проектной формы по высоте  $h$  стенки, мм

| $h$ , мм | Участок 1 | Участок 2 |
|----------|-----------|-----------|
| 0        | - 5       | - 9       |
| 1490     | - 41      | - 22      |
| 2980     | - 40      | - 31      |
| 4470     | - 35      | - 23      |
| 5960     | - 27      | 18        |
| 7450     | - 10      | 14        |
| 8940     | - 20      | - 4       |
| 10430    | - 23      | - 10      |
| 11920    | - 31      | 22        |
| 13410    | - 33      | - 5       |
| 14900    | - 18      | - 9       |
| 16390    | 12        | - 15      |
| 17880    | 2         | - 4       |

первые шесть поясов (снизу), поскольку они являются самыми активными участками стенки. По нижней границе стенки приняты условия жесткого заземления в соединении стенки с днищем, что идет в некоторый запас надежности. По верхней кромке обеспечивается свобода линейных перемещений при ограничении угла поворота направляющей, что примерно соответствует условиям в середине стенки. По вертикальным кромкам рассматриваемого фрагмента поставлены граничные условия, вытекающие из симметрии задачи.

Расчет выполнялся по конечно-элементной модели, включающей прямоугольные и треугольные оболочечные элементы. Размер этих элементов не превышал 627 мм по горизонтали и 745 мм по вертикали для участка стенки, удаленного от места ремонта, с последующим четырехкратным уменьшением в участке вставок. Схема дробления стенки на конечные элементы представлена на рис. 4. Ширина вставок в кольцевом направлении принята средней между фактической (2000 и 3000 мм) их длиной и составляет 2500 мм. Толщина листов-вставок и элементов стенки принята в соответствии с табл. 1.

Расчет выполнялся с учетом работы материала стенки в упругой области нагружения, имеющего следующие характеристики: модуль упругости  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

Стенка рассматриваемого эталонного резервуара с принятыми искажениями фактически соответствует реальной конструкции стенки резервуара № 4 после ремонта. В ней выбраны характерные участки на двух вертикалях, в которые вваривали специальные вставки.

Искаженная форма резервуара определена замерами максимальных отклонений от проектной формы, выполненными на уровне горизонтальных швов в точках, которые расположены посередине листов-вставок. Результаты замеров представлены в табл. 2.

Учитывая, что измерения выполнены с определенной погрешностью, их результаты были «сглажены» путем решения задачи о наилучшем среднеквадратичном приближении. Получены следующие зависимости соответственно для участков стенки 1 и 2:

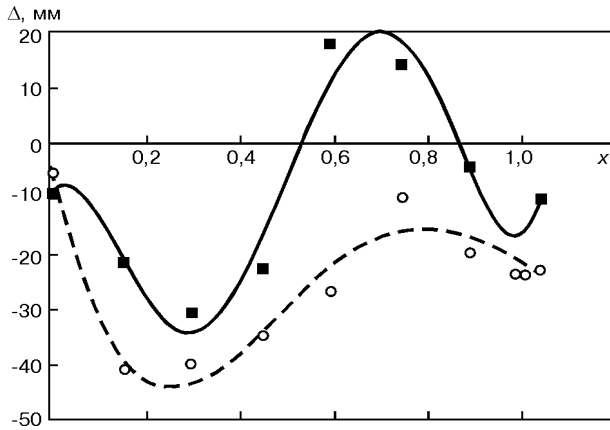


Рис. 5. Кривые сглаживания замеренных отклонений  $\Delta$  стенки: штриховая линия — участок стенки 1; сплошная — участок стенки 2

$$\Delta(x) = 4185,36x^5 - 10507,9x^4 + 8657,32x^3 - 2471,16x^2 + 128,509x - 9,11538;$$

$$\Delta(x) = 916502x^5 + 124,144x^4 - 895,411x^3 + 1019,66x^2 - 356,115x - 5,465035,$$

где  $x$  — координата ( $\text{мм} \cdot 10^4$ ).

На рис. 5 показаны кривые, построенные по этим уравнениям. Предполагалось, что фактическая поверхность, отклонившаяся от идеальной цилиндрической оболочки, выражается следующим уравнением в цилиндрической системе координат:

$$\rho = 19950 + \Delta(x) \sin^2 [\pi S/L],$$

где  $\rho$  — координата точки на поверхности стенки;  $S$  — координата вдоль дуги;  $L$  — длина дуги зоны возмущения (с усреднением принято  $L = 2500$  мм).

Значительно искаженная по радиальной координате схема этой поверхности (участок стенки 2) показана на рис. 6.

Все расчеты выполняли при условии нагружения оболочки наливом воды высотой 17 м, что соответствует максимальному проектному наливу

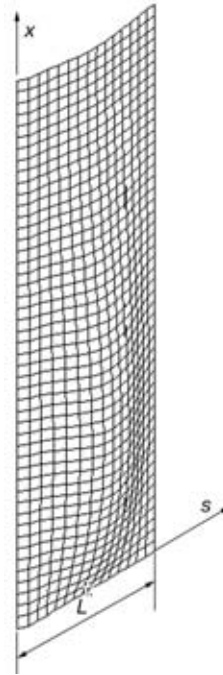


Рис. 6. Схематическое изображение (развертка) поверхности отклонения стенки (участок стенки 2)

при эксплуатации резервуара. Вначале были проведены расчеты с геометрическими параметрами участков стенки 1 и 2 в линейной постановке, т. е. без учета величин второго порядка. Оказалось, что полученные при этом радиальные перемещения весьма значительны (до 500 мм). Большие значения перемещений свидетельствовали о необходимости проведения расчетов в геометрически нелинейной постановке. При этом получили значения перемещения примерно на порядок меньше, чем при линейном расчете. Полученные значения хорошо коррелируют с реальными замерами. Напряженное состояние стенки изменилось при этом на 5... 40 %. На рис. 7 представлена качественная картина распределения кольцевых напряжений в участках стенки 1 и 2. Из расчетов следует, что максимальные напряжения на участке стенки 1 составляют 202,4, а на

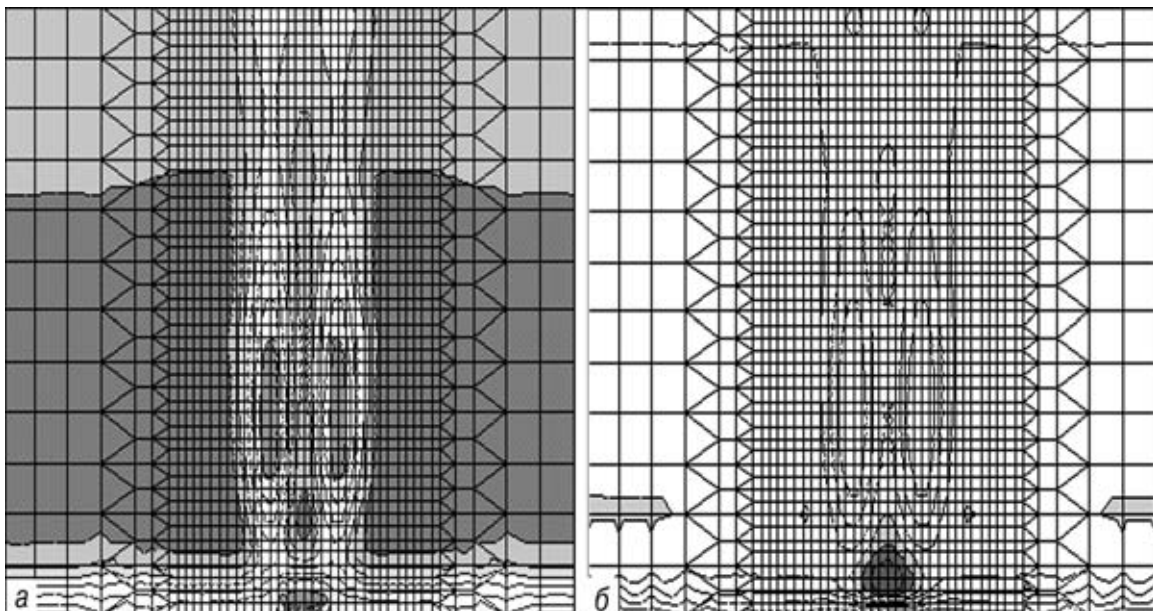


Рис. 7. Распределение кольцевых напряжений при нелинейном расчете в участках стенки 1 (а) и 2 (б)



участке стенки 2 — 329,6 МПа, т. е. не превышают нормативных значений  $\sigma_T$  материала стенки толщиной 16 мм (сталь 09Г2С). Эквивалентные напряжения (по 4-й теории прочности) достигают значений  $\sigma_B$ . Однако следует учитывать, что значения  $\sigma_B$  получены исходя из предположения, что заданные отклонения присутствуют и при расчетном наливе высотой 17 м. Как показали наблюдения, уже при наливе на 3...4 м выше уровня расположения заданных отклонений форма стенки приближается к проектной, а значения отклонений уменьшаются в 2...3 раза. Это дает возможность ограничиваться только выполнением предлагаемого условия  $\sigma_{к.м} < \sigma_T$ .

Результаты проведенных исследований позволили реально оценить влияние местных отклонений от проектной формы на напряженное состояние стенки резервуара и назначить на них допуски при разработке рабочего проекта ремонта стыков.

1. Раевский Г. В. Изготовление стальных вертикальных цилиндрических резервуаров методом сворачивания. — М.; Л.: Гостоптехиздат, 1952. — 116 с.
2. Билецкий С. М., Голинько В. М. Индустриальное изготовление негабаритных сварных листовых конструкций. — Киев: Наук. думка, 1983. — 272 с.
3. Проблемы сооружения резервуарных парков / С. М. Билецкий, В. Б. Чаплин, В. М. Голинько, Ю. П. Барвинко // Буд-во України. — 1997. — № 3. — С. 29–31.
4. РД 39-30-1331-85. Инструкция по усилению вертикальных монтажных стыков стенок резервуаров РВС-20000. — Введ. с 01.01.86 по 01.01.91. — М., 1985. — 6 с.
5. ВСН 311-81. Инструкция по изготовлению и монтажу вертикальных цилиндрических резервуаров. — М., 1982. — 99 с.

Analysis of different methods for making erection vertical welded joints in walls of tanks manufactured from coiled billets is given. It is suggested that in repair of welded joints and in construction of new tanks the joints should be made by welding-in of special plate inserts. Theoretical estimation of local stresses in the tank wall after welding-in of the inserts, allowing for actual radial distortions of the wall, is presented.

6. Билецкий С. М., Голинько В. М., Барвинко Ю. П. Пути повышения эксплуатационной надежности сварных цилиндрических резервуаров, изготавливаемых из рулонированных заготовок // Автомат. сварка. — 1990. — № 3. — С. 50–52.
7. API-650. Welded steel tanks for oil storage. — Washington, 1980. — 137 p.
8. Поповский Б. В., Джур Ю. Ф. Этапы решения задачи сборки вертикальных стыков стенок резервуаров // Монтажные и специальные работы в строительстве. — 2000. — № 10. — С. 4–7.
9. О допусках на угловые деформации вертикальных сварных стыков в резервуарах вместимостью 10...50 тыс. м<sup>3</sup> для хранения нефти и нефтепродуктов / Ю. П. Барвинко, С. М. Билецкий, В. М. Голинько, В. В. Якубовский // Автомат. сварка. — 1991. — № 4. — С. 20–23.
10. О допусках на угловые деформации вертикальных стыков стенок нефтерезервуаров / Б. В. Поповский, Г. А. Ритчик, Ю. П. Барвинко, С. М. Билецкий, В. М. Голинько // Монтажные и специальные работы в строительстве. — 1991. — № 5. — С. 11–12.
11. ВСН 311-89. Монтаж стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов вместимостью от 100 до 50000 м<sup>3</sup>. — М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1990. — 60 с.
12. О работоспособности вертикальных цилиндрических резервуаров вместимостью 50 тыс. м<sup>3</sup> из стали 16Г2АФ / А. Ю. Барвинко, Ю. П. Барвинко, В. М. Голинько, В. Г. Тулин // Трубопровод. трансп. нефти. — 1999. — № 9. — С. 24–27.
13. ТП 704-1-171-84. Альбом VI: Проект производства монтажных работ. Монтаж резервуара. — Введ. 23.05.83. — М., 1983. — 33 с.
14. Лялин К. В. Некоторые аспекты совершенствования конструкции и технологии сборки и сварки цилиндрических резервуаров // Монтажные и специальные работы в строительстве. — 1997. — № 7. — С. 10–13.
15. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. — К.: Держкомнафтогаз, 1994. — 98 с.

Поступила в редакцию 18.10.2000,  
в окончательном варианте 20.02.2001