

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО УСЛОВИЯМИ ПРОЧНОСТИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Ю. В. РАДЫШ, А. С. КИРЕЕВ

Безаварийная эксплуатация резервуаров для хранения нефти поддерживается в соответствии с действующей нормативно-технической документацией посредством выполнения регламента либо ремонтов [1], либо обследований [2–4]. Регламент ремонтов резервуаров обязателен к выполнению для предприятий нефтеперерабатывающих и нефтехимических отраслей промышленности, тогда как регламент обследований — для предприятий, обеспечивающих транспортировку и хранение нефти. Программа текущего, среднего и капитального ремонтов предусматривает проведение ревизий при подготовке резервуаров к ремонту с целью составления дефектной ведомости, на основании которой выполняется этот ремонт. Программа частичного и полного обследований предусматривает оценку технического состояния резервуаров. На основании соответствия (либо несоответствия) качественных и количественных результатов контроля технического состояния требованиям нормативно-технической документации может быть принято одно из следующих возможных решений:

- продолжить эксплуатацию без ограничений (вплоть до очередного обследования);
- продолжить эксплуатацию с ограничением срока либо технологических режимов нагружения;
- выполнить ремонтно-восстановительные работы;
- демонтировать и при необходимости заменить металлоконструкции.

Таким образом, подчиненность регламенту обследований представляется наиболее ответственным и достоверным средством оценки текущего состояния и прогнозирования надежности резервуаров как условия обоснованного принятия решения по обеспечению их безаварийной эксплуатации. Однако и при этом подходе возникают проблемы, требующие совершенствования нормативной и технической базы диагностики состояния, а также прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти [5, 6]. В частности, как при продлении эксплуатации с ограничением технологических режимов, так и при введении резервуаров в эксплуатацию после ремонта возникает необходимость установить допустимый условиями прочности уровень наполнения резервуаров. Действующими нормативными документами [1–4] предусматривается возможность оценки этого уровня при расчете прочности резервуара по предельному состоянию в соответствии с нормами проектирования строительных конструкций [7–9] на основе следующего критерия: *максимальное кольцевое напряжение  $\sigma_k$  не должно превышать нормативно допустимое  $[\sigma]$ , т. е.*

$$\max \sigma_k \leq [\sigma] R_y \gamma_c, R_y = R_{yn} / \gamma_m, \quad (1)$$

где  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы пояса;  $\gamma_m$  — коэффициент надежности материала;  $R_{yn}$ ,  $R_y$  — соответственно нормативное (минимальное значение предела текучести) и расчетное сопротивление.

Кольцевые напряжения в стенке резервуара на высоте  $X$  от дна без учета сопряжения поясов различной толщины равны

$$\sigma_k = pR/t, \quad (2)$$

где  $p = n_1 \rho g (H_{np} - X)$  — гидростатическое давление;  $n_1$  — коэффициент перегрузки для гидростатического давления;  $\rho$  — плотность продукта;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения,  $H_{np}$  — уровень наполнения продуктом;  $t$  — толщина стенки в данной точке;  $R$  — радиус кривизны срединной поверхности стенки резервуара.

При расчетах стенка резервуара рассматривается как тонкостенная безмоментная цилиндрическая оболочка, составленная из поясов, различающихся по толщине и материалу листового проката. Оценка выражения (2) имеет неудовлетворительный характер в области сопряжения поясов между собой и с дном вследствие разрывности функций кольцевых напряжений и радиальных перемещений. Указанный недостаток может быть устранен на основании выполнения условий непрерывности перемещений и углов поворота в этих сопряжениях одновременно с определением перерезывающих сил и крутящих моментов согласно методике, изложенной в [10]. Однако нормативное требование выражения (1) оказывается совершенно неприемлемым для оценки уровня наполнения резервуара, геомет-

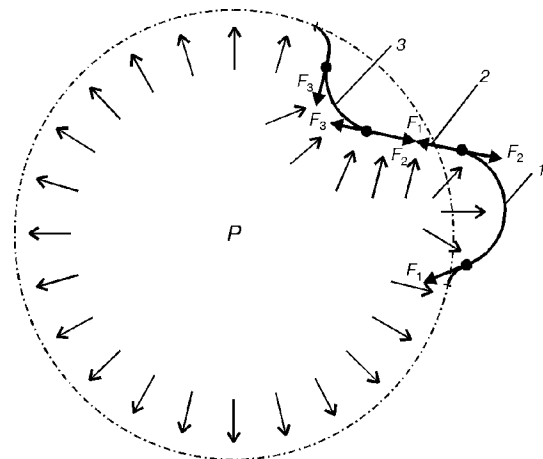


Рис. 1. Силы  $F_1$ – $F_3$ , приложенные к различным участкам цилиндрического резервуара, находящегося под действием внутреннего давления  $P$ ; 1–3 — номера участков.

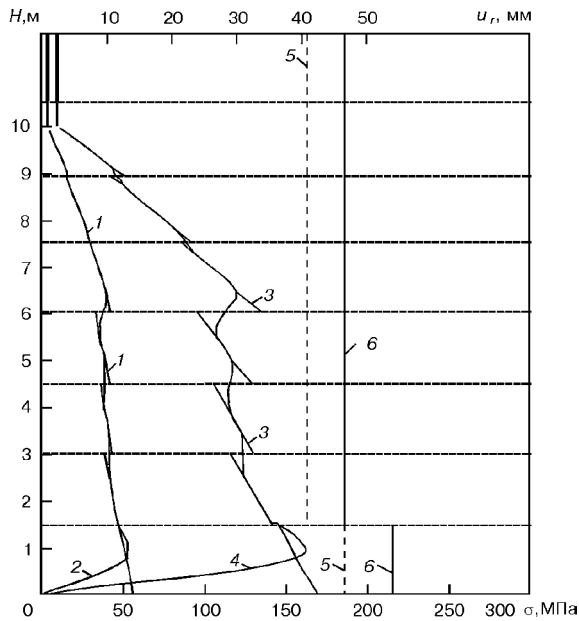


Рис. 2. Перемещения (1, 2) и кольцевые напряжения (3, 4) стенки резервуара при уровне нефти 10 м с коэффициентом перегрузки 1,1 и избыточном давлении 2 кПа с коэффициентом перегрузки 1,2: 1, 3 — без учета стыка; 2, 4 — с учетом стыка; 5 — напряжения допустимые [9]; 6 — то же [8].

рическая форма стенки которого имеет отклонения от идеальной формы кругового цилиндра.

Рассмотрим равновесие части стенки цилиндрического резервуара, находящегося под действием внутреннего давления. Часть стенки, имеющая радиальное отклонение от идеальной формы кругового цилиндра, изображена на рис. 1 (вид сверху). Она состоит из трех участков  $i = 1, 2, 3$ , кривизна  $k_i = 1/R_i$  которых с учетом знака составляет соответственно  $k_1 > 0, k_2 = 0, k_3 < 0$ . Из условий равновесия, определяющих согласно выражению (2) кольцевые напряжения каждого из участков, следует, что участок 1 находится в состоянии растяжения с напряжениями  $\sigma_{к1} > 0$ , участок 3 — в состоянии сжатия с напряжениями  $\sigma_{к3} < 0$ . При этом участок 2 с неопределенными по формуле (2) напряжениями вообще не может находиться в равновесии, поскольку приложенные к нему силы со стороны растянутого участка 1 и сжатого участка 3 действуют в одну и ту же сторону. В действительности рассматриваемая часть стенки резервуара указанной геометрической формы и каждый из ее участков находятся в равновесии, что противоречит установленному по выражению (2) распределению кольцевых напряжений. Следовательно, исключается возможность оценки допустимого уровня наполнения резервуара реальной геометрической формы на основе нормативного требования критерия (1).

Данное обстоятельство требует расчета напряженно-деформированного состояния резервуара по более полной моментной теории оболочек. При этом возникает проблема оценки допустимого уровня наполнения резервуара реальной геометрической формы.

В соответствии с действующими нормативными требованиями, принципами проектирования и рас-

чета стальных вертикальных резервуаров [7–9, 11, 12] можно предложить три подхода к оценке допустимого уровня прочности уровня наполнения резервуаров.

*Первый* (существующий) основан на расчете кольцевых напряжений в стенке резервуара идеализированной геометрической формы согласно уравнению (2). Эти напряжения при наполненном резервуаре не должны превышать допустимых, определенных критерием (1).

*Второй* подход базируется на расчете полных (мембранных и изгибных) эквивалентных напряжений в стенке резервуара реальной геометрической формы согласно формуле

$$\sigma_{эkv} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)^{0,5}, \quad (3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  — главные напряжения двумерного напряженного состояния стенки, которые при наполненном резервуаре не должны превышать допустимых значений, определенных следующим критерием:

$$\max \sigma_{эkv} \leq [\sigma] = R_y, R_y = R_{yn}/\gamma_m. \quad (4)$$

*Третий* подход основан на разделении полных напряжений на мембранные и изгибные в стенке резервуара реальной геометрической формы. При этом мембранные определяются действующими в срединной поверхности стенки эквивалентными напряжениями по формуле (3)

$$\sigma_m = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)^{0,5}, \quad (5)$$

Изгибные, равные нулю в срединной поверхности, достигают на граничных поверхностях стенки наибольшего значения

$$\sigma_n = 6M/h^2, \quad (6)$$

где  $M$  — изгибающий момент;  $h$  — толщина стенки.

Данные напряжения при наполненном резервуаре не должны превышать допустимых значений, определяемых следующими критериями:

$$\max \sigma_m[\sigma] \leq R_y\gamma_{cm}, R_y = R_{yn}/\gamma_m, \quad (7)$$

$$\max \sigma_n[\sigma] \leq R_y\gamma_{cn}, R_y = R_{yn}/\gamma_m, \quad (8)$$

где  $\gamma_{cm}$  и  $\gamma_{cn}$  — условие работы соответственно при мембранных и изгибных напряжениях.

Коэффициенты условий работы в неравенствах (1), (7) принимаются согласно выражению [7] равными

$$\begin{aligned} \gamma_c = \gamma_{cm} = 0,6 \text{ (для нижнего пояса стенки),} \\ \gamma_c = \gamma_{cn} = 0,7 \text{ (для остальных поясов).} \end{aligned} \quad (9)$$

В неравенстве (8) коэффициент условий работы принимается согласно публикациям [7, 9]

$$\gamma_{cn} = 1,2. \quad (10)$$

Использование одних и тех же коэффициентов условий работы в критериях (1) и (7) обусловлено тем, что при исправлении геометрической формы стенки резервуара мембранные напряжения, вызванные гидростатической нагрузкой, переходят в кольцевые. Использование в критерии (8) коэффициента условий работы, превышающего единицу,

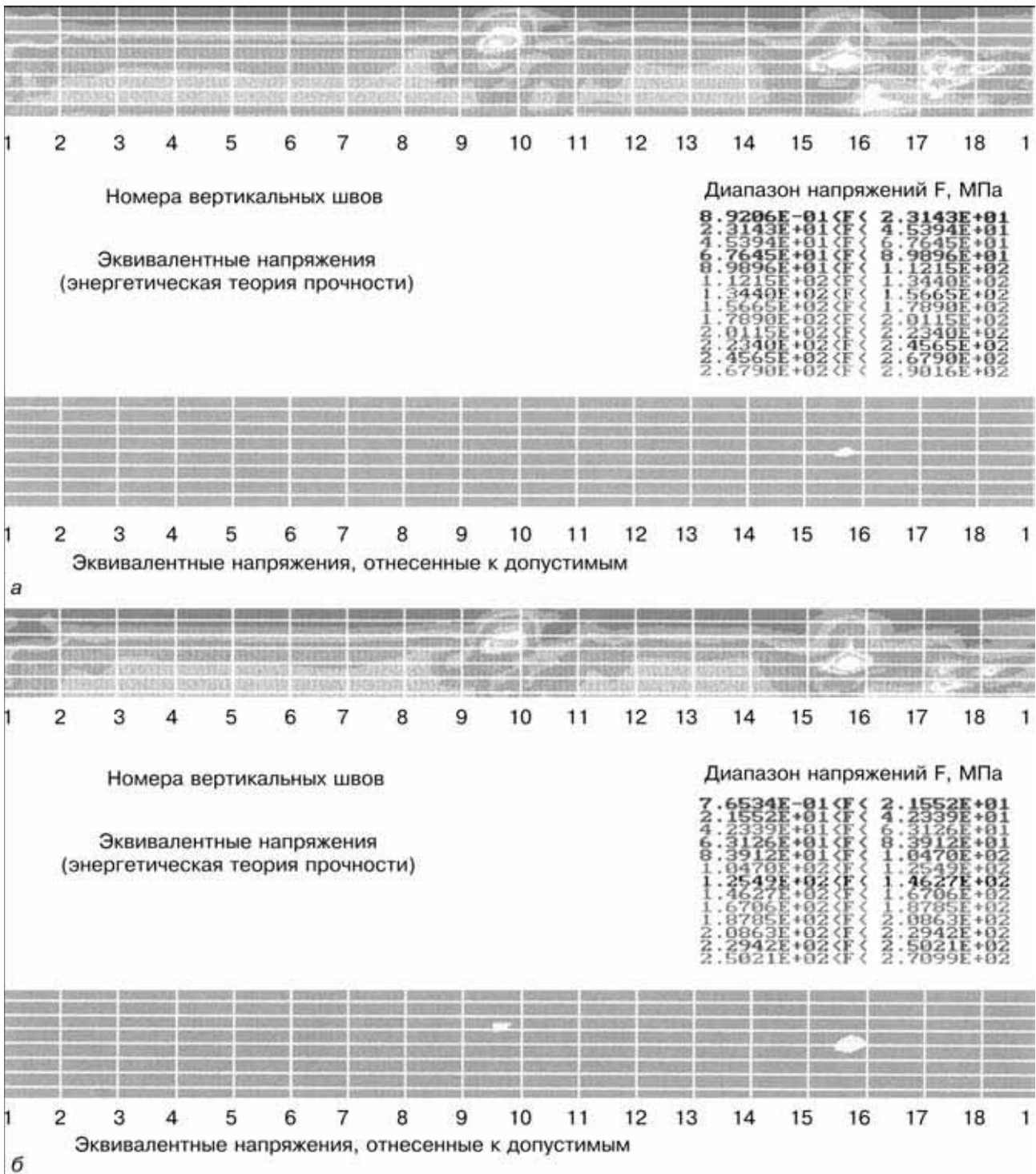


Рис. 3. Напряженное состояние стенки резервуара при уровне нефти 10 м: а — мембранные и изгибные, б — мембранные напряжения.

свидетельствует о допустимости пластических шарниров при деформировании стенки резервуара в условиях эксплуатации и гидравлических испытаний [12]. Последнее может быть использовано как возможный метод исправления геометрической формы резервуара в ходе гидравлических испытаний.

Из указанных трех подходов оценки допустимого условиями прочности уровня наполнения резервуара предпочтение следует отдать тому, для которого допустимый уровень окажется наименьшим.

Для сравнения этих подходов на рис. 2, 3 приведено распределение осесимметричных кольце-

вых, полных (мембранных и изгибных) и мембранных напряжений в стенке одного из обследованных резервуаров РВС-10000, геометрическая форма которой показана на рис. 4. Во всех случаях в качестве внешней нагрузки рассматривалось внутреннее гидростатическое давление на стенку резервуара при уровне наполнения нефтью 10 м. Сравнительный анализ использования критериев (1), (4), (7) свидетельствует о правомерности оценки допустимого уровня наполнения резервуара на основании последнего из изложенных подходов с использованием критериев (7), (8). Следует отметить, что для рас-

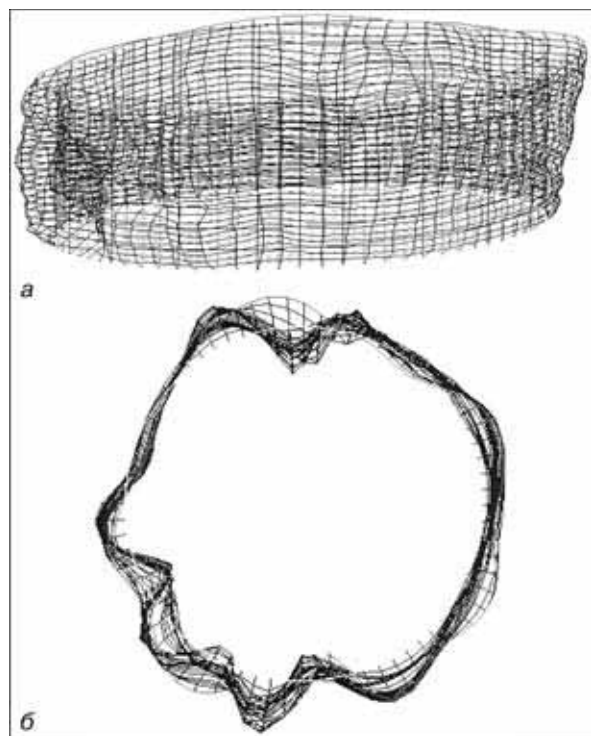


Рис. 4. Геометрическая форма стенки резервуара: а — изометрия; б — вид сверху.

чета напряженно-деформированного состояния резервуара неидеальной геометрической формы требуется применение численных методов. Приведенные на рис. 3, 4 результаты расчета полных и мембранных напряжений получены при решении задачи упругого деформирования стенки резервуара на основе метода конечных элементов.

Корп. «Укрмонтажспецстрой», Техн. комитет «Спецмонтаж», Киев

Поступила в редакцию  
30.11.2000

УДК 620.13.38

## КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ С МНОГОСЛОЙНОЙ СТЕНКОЙ. 1. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПЕРЕНОСА ПО МЕЖСЛОЙНЫМ ЗАЗОРАМ

Ю. Н. ПОСЫПАЙКО

**Общая характеристика проблемы.** Разработка, изготовление и эксплуатация изделий с многослойной стенкой — аппаратов химических производств, трубопроводов, резервуаров и т. п. вызвано растущими требованиями к повышению производительности, мощности, надежности и безопасности оборудования высокого давления [1–3].

Особенностью технологии технического контроля таких изделий является необходимость испыта-

1. *ИТН-93.* Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. — Волгоград: Минтопэнерго России, 1995. — 188 с.
2. *Правила* технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. — М.: Недра, 1988. — 269 с.
3. *Правила* технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту (доповнення та зміни). — Київ. — 1997. — 121 с.
4. *РД-08-95-95.* Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М.: Госгортехнадзор России, 1995. — 34 с.
5. *Тенденции* в развитии комплексных требований к резервуарам для хранения нефти (зарубежный опыт) / А. М. Бородавский, Б. М. Медник, Ю. В. Радыш, А. А. Цвигун. — Киев: Основа, 2000. — 208 с.
6. *Радыш Ю. В., Киреев А. С.* Совершенствование базы диагностики технического состояния и прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 38–47.
7. *СНиП 2.09.03-85.* Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Сооружения промышленных предприятий. — М.: Госстрой, 1986. — 56 с.
8. *СНиП 11-23-81\*.* Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Стальные конструкции. М.: Госстрой, 1990. — 95 с.
9. *ВБН В.2.2-58.2-94.* Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти та нафтопродуктів з тиском не вище 93,3 кПа. — Київ: Держ. комітет України по нафті і газу, 1994. — 98 с.
10. *Тимошенко С. П., Войтовский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. — М.: Наука, 1966. — 635 с.
11. *СНиП 2.01.07-85.* Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. — М.: Госстрой, 1987. — 36 с.
12. *Лессиг Е. Н., Лилеев А. Ф., Соколов А. Г.* Листовые металлические конструкции. — М.: Госстройиздат, 1970. — 488 с.

ния на герметичность внутренних сварных соединений [4]. Это вызвано возможностью возникновения в процессе сварки сквозных дефектов во внутренних сварных швах, что может привести к проникновению рабочего, хранящегося или транспортируемого вещества из полости изделия в полость межслойных зазоров многослойной стенки. Накопление его там может стать причиной нарушения нормальной работы изделия или его разрушения.

© Ю. Н. Посыпайко, 2001