



ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ДОПУСКАЕМЫХ РАЗМЕРОВ ГЕРМЕТИЧНЫХ «ПУЗЫРЕЙ» ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ВОДОРОДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ

В. П. ДЯДИН, Е. А. ДАВЫДОВ, А. Е. ЛИТВИНЕНКО, Е. А. ГОНЧАР

Рассмотрены особенности оценки технического состояния корпусов нефтехимического оборудования, подвергнутых низкотемпературному водородному растрескиванию. Предложен упрощенный инженерный подход для предварительной оценки степени поврежденности металла при наличии герметичных «пузырей». Представлены практические результаты УЗ-контроля и тензометрирования в месторасположении «пузырей» при гидравлическом нагружении натурного сепаратора.

Considered are the features of assessment of the technical condition of petrochemical equipment cases susceptible to low-temperature hydrogen cracking. A simplified engineering approach is proposed for preliminary assessment of the degree of metal damage in the presence of air-tight Ybubbles. The paper gives practical results of UST and strain gauging in the Ybubble location at hydraulic loading of the full-scale separator.

На установках первичной переработки нефти, эксплуатирующихся более 20 лет, в результате электрохимической коррозии в водных сероводородсодержащих средах довольно часто наблюдаются случаи низкотемпературного водородного растрескивания оборудования. При техническом диагностировании аппаратов, подвергшихся такого рода повреждениям, следует отметить ряд трудностей, связанных с определением их технического состояния и оценкой дальнейшего срока службы.

Так, на практике при оценке работоспособности оборудования принято вычитать весь поврежденный слой металла или в случае локального повреждения стенки рассматривать как ослабление коррозионной выемкой [1, 2]. Данный подход не учитывает местного внутреннего давления в растрескавшихся коррозионных полостях, которое в зависимости от глубины залегания дефекта, его размера и толщины стенки может играть в ряде случаев существенное значение. Растущее давление молекулярного газа в несплошностях в зависимости от степени сопротивления материала росту трещиноподобных дефектов может вызвать его пластическое деформирование и формирование вздутий. Как следствие, это приводит к снижению прочности корпуса аппарата, что не исключает возможной разгерметизации стенки и выхода пожаро- и взрывоопасных углеродистых соединений.

Определение фактической величины давления и скорости притока молекулярного водорода при постоянном росте несплошности в общей постановке также является довольно сложной задачей и требует, помимо интегральных оценок состава среды и электрохимических процессов в ней, дополнительной вы-

резки пробы металла для проведения специальных лабораторных исследований. А это практически исключается при техническом диагностировании действующего оборудования.

В первую очередь, это связано с определением скорости развития растрескивания как в плоскости листа, так и в направлении его толщины. При этом необходимо дополнительно учитывать, что данный процесс в зависимости от размеров несплошностей, глубины залегания и вязкости разрушения металла K_{1c}^z может развиваться с пластическим деформированием прослойки и без него.

В случае, когда слоистое растрескивание корпуса аппарата происходит при низких значениях K_{1c}^z (без пластического деформирования прослойки), то несущую способность можно оценить исходя из критериев механики разрушения и результатов испытаний на ударную вязкость [3, 4]. Однако, это также требует привлечения специальных методов контроля и дополнительных лабораторных исследований вырезанной пробы металла из действующего оборудования.

При пластическом деформировании прослойки ($\epsilon > 0,2\%$) над расслоенной полостью (наличие «пузыря») появляется практическая возможность с помощью визуального и упрощенных неразрушающих методов контроля следить за изменением степени поврежденности (перегрузки) данных участков в процессе эксплуатации.

Систематическое наблюдение за такими дефектами при условии определения внутреннего давления в «пузыре» дает возможность практически оценить скорость стока молизованного газа в несплошность (можно принять, что состояние среды

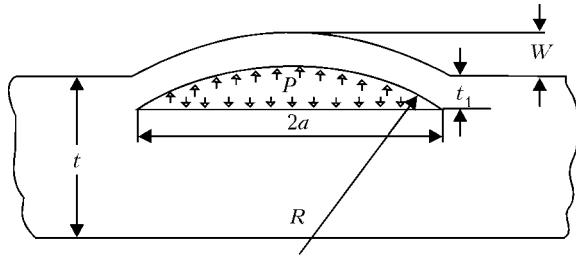


Рис. 1. Модель пластического выпучивания

в полости описывается уравнением состояния идеального газа и все процессы изотермические) и прогнозировать дальнейший срок службы оборудования. В этом случае при диагностическом обследовании наиболее полную и документированную картину степени и характера поврежденности слоистыми растрескиваниями действующего оборудования дают ультразвуковые компьютеризированные системы контроля, позволяющие визуализировать и сохранять результаты сканирования поврежденных участков. Это в дальнейшем позволяет по результатам повторного контроля реперных участков оценить скорость развития растрескивания и определить, на какой стадии находится данный процесс. Последнее базируется на многочисленных результатах обследований оборудования, полученных при использовании ультразвуковой автоматизированной системы и расчетных моделях достижения критических состояний в зависимости от характера слоистого растрескивания в водородосодержащих средах.

В данной статье предложен упрощенный инженерный подход к оценке внутреннего давления в «пузыре» и его влияния на напряженно-деформированное состояние наружной стенки корпуса поврежденного аппарата. Для решения данной задачи в первом приближении предлагается пластическая модель выпучивания прослойки (рис. 1) по аналогии гидравлического нагружения заземленной круглой пластины с постоянным радиусом кривизны. Основанием для данного допущения можно принять результаты работы [5], где отмечается, что при гидравлическом выпучивании заземленной пластины отклонение ее формы от сферической невелико.

В этом случае давление внутри сферической полости и ее объем (без учета упругого прогиба основания) при условии деформационного упрочнения материала можно описать простыми зависимостями:

$$V = \pi w(3a^2 + w^2) / 6, \quad (1)$$

$$P = 4\sigma_{0,2}(2/(3\varepsilon_r))^n(a/w + w/a)^{-(2n+1)} \times (1+2/3(a/w + w/a)^{-2})^{-1}t_1/a, \quad (2)$$

где w — прогиб выпученного участка; a — радиус полости; t_1 — толщина пластического слоя; t — толщина листа; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала; ε_r — деформация соответствующая $\sigma_{0,2}$; n — величина деформационного упрочнения материала.

Полный вывод зависимости (2) не приводится в виду его очевидности. Он вытекает из геомет-

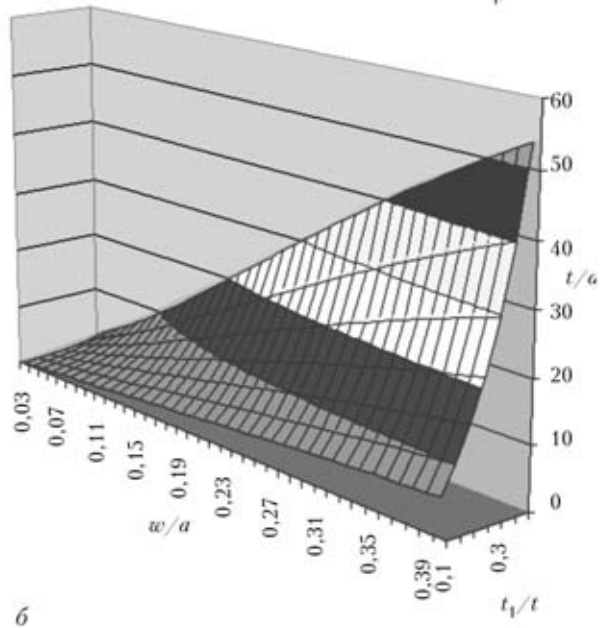
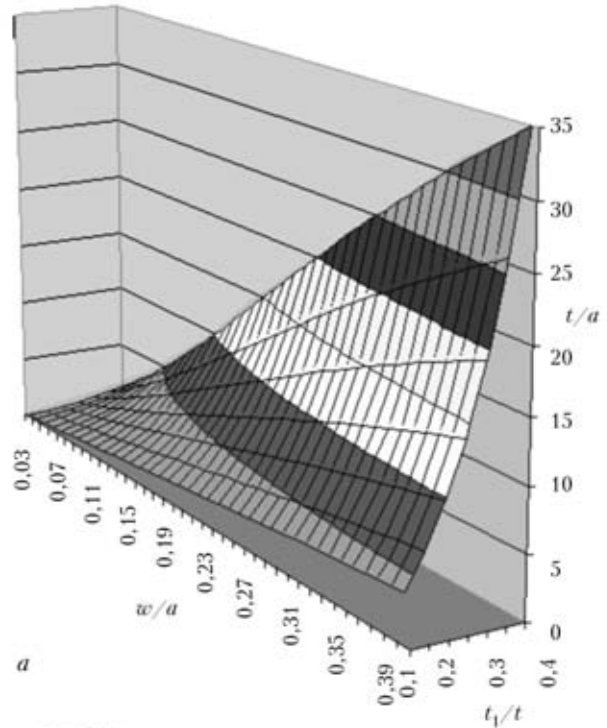


Рис. 2. Области допускаемых относительных размеров несплошностей, рассчитанные по формулам (5), (6) соответственно (а) и (б) для сталей марок 09Г2С и 16ГС

рического решения определения напряжения через пластическое деформирование срединного слоя выпучивающейся полосы по степенному закону упрочнения $\sigma = \sigma_{0,2}(\varepsilon/\varepsilon_r)^n$ (см. рис. 1) и разложения в ряд до второго члена функции угла половины дуги ($\text{arc sin } x \approx x + x^3/6$). При этом следует отметить, что для упрощения вывода зависимости (2) выражение для степенного упрочнения принималось как для одноосного растяжения.

В случае, когда относительная толщина пластического слоя мала по сравнению с толщиной листа, для равномерно нагруженной круглой пластины толщиной $(t - t_1)$, заземленной по контуру,



максимальные упругие изгибные напряжения σ_r на контуре и в центре соответственно определяются следующими выражениями [6]:

$$(\sigma_r)_{r=a} = -3Pa^2 / (4(t - t_1)^2), \quad (3)$$

$$(\sigma_r)_{r=0} = 3Pa^2(1 + \nu) / (8(t - t_1)^2), \quad (4)$$

где P — давление в полости; ν — коэффициент Пуассона.

Для упрощения выкладок пока достаточно рассмотреть изгиб на плоскости, а не на цилиндрической поверхности.

Подставляя выражение (2) в зависимость (3) и принимая за предельное состояние, например, по первой теории прочности, появление локальной пластической деформации на наружной поверхности корпуса в центре поврежденной зоны, можно оценить допустимые размеры несплошностей в зависимости от глубины их залегания $t - t_1$ и высоты выпучивания пластической прослойки w :

$$1 \geq 3(2 / (3\epsilon_T))^n (a/w + w/a)^{-(2n+1)} \times (1 + 2/3(a/w + w/a)^{-2})^{-1} \times (1 + \nu) / (2t/a(t/t_1 + t_1/t - 2)). \quad (5)$$

Для края, исходя из зависимостей (2) и (4), условие появления пластической деформации определяется выражением:

$$1 \geq 3(2 / (3\epsilon_T))^n (a/w + w/a)^{-(2n+1)} \times (1 + 2/3(a/w + w/a)^{-2})^{-1} / (t/a(t/t_1 + t_1/t - 2)). \quad (6)$$

Как пример, на рис. 2 представлены области относительных критических размеров несплошностей, рассчитанные по формулам (5), (6) в зависимости от $(t/a, t_1/t, w/a)$ для сталей марок О9Г2С и 16ГС с принятыми значениями пределов текучести и временного сопротивления по ГОСТ14249-89. Величина деформационного упрочнения n определялась по инженерной зависимости, предложенной в работе [8]:

$$n = -0,182 + 0,222(\sigma_B / \sigma_{0,2}). \quad (7)$$

Как следует из выражений (5), (6), область допустимых размеров дефекта на рис. 2 должна лежать выше расчетной плоскости по оси t/a .

Представленные данные могут быть полезны для предварительной оценки технического состо-



Рис. 3. Сепаратор, подвергнутый низкотемпературным водородным повреждениям (1-4 — номера обечаек)

яния и степени безопасной поврежденности технологического оборудования нефтеперерабатывающей промышленности соответствующими службами технического надзора.

Следует, однако, отметить, что в данном случае не учитываются рабочие напряжения в стенке аппарата, которые могут несколько ужесточить требования к предложенным допускаемым размерам дефекта. Для предварительной оценки их влияния на изменения напряженного состояния в зонах напряженных герметичных несплошностей были проведены экспериментальные исследования при условии гидравлического нагружения натурального сепаратора (рис. 3).

Данный аппарат находился в работе более 30 лет в газовой среде с содержанием H_2 до 95 % объема $\gamma = 0,16$ кг/мм²; H_2S до 0,004 % и в результате низкотемпературного водородного растрескивания корпуса на большую глубину был выведен из эксплуатации. Рабочее давление в сепараторе объемом 20 м³ составляло не более 3,9 МПа при температуре плюс 35 °С. Внутренний диаметр обечаек (общей длиной 5400 мм) составляет 2000 мм при толщине стенки и полуэллиптических днищ 36 мм. Аппарат был изготовлен в 1971 г. из стали марки 16ГС по ГОСТ 5520-62 (временное сопротивление разрыву не ниже $\sigma_B = 470$ МПа; предел текучести не ниже $\sigma_{0,2} = 300$ МПа; относительное удлинение в процентах $\delta_5 = 21$).

Простой аппарата на момент проведения тензометрирования, ультразвукового контроля и гидравлического нагружения составил 4 месяца.

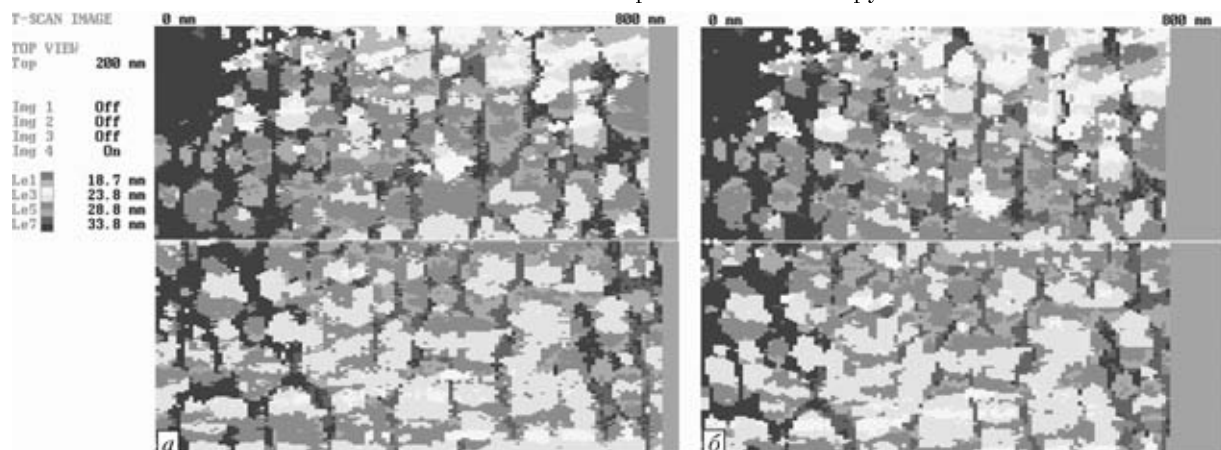


Рис. 4. Результаты ультразвукового сканирования участка с дефектом № 1 до (а) и после (б) гидравлического нагружения



Геометрические размеры дефектов

Дефект	Диаметр дефекта, мм (рис. 1, 2a)	Средняя толщина t_1 пластического слоя, мм	Толщина корпуса t , мм	Высота w пластического выпучивания, мм	Давление в полости по (2), МПа	Расчетные напряжения на внешней стенке, МПа	
						на краю дефекта (3)	в центре дефекта (4)
№ 1	80	7,0	35	3,0	15,8	24,2	15,7
№ 2	190	10,5	35	7,5	10,7	120,4	78,3

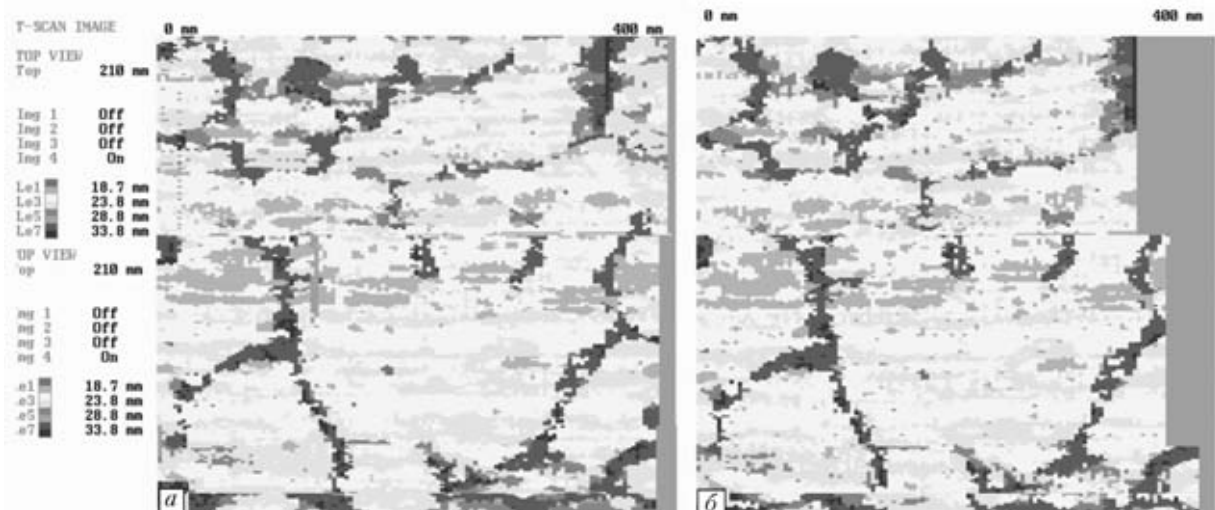


Рис. 5. Результаты ультразвукового сканирования участка с дефектом № 2 до (а) и после (б) гидравлического нагружения

В результате проведенного визуального контроля были выбраны два участка на корпусе, подвергнутые различным степеням низкотемпературного водородного повреждения. За основу в первую очередь выбирались зоны с герметичными вздутиями, залегающие на различных глубинах. Так, на обечайке № 2 (см. рис. 3, отсчет обечайек ведется справа налево) был выбран участок с дефектом № 1, расположенным на удалении 460 мм от кольцевого шва, а на нижней части обечайки № 3 дефект № 2, расположенный на удалении 570 мм от кольцевого шва. Дефекты выбирались таким образом, чтобы можно было максимально исключить влияние дниц и сварных соединений на напряженно-деформированное состояние данных участков при гидравлическом нагружении цилиндрической оболочки. Геометрические размеры дефектов и глубины их залегания представлены в таблице.

Результаты сканирования ультразвуковой компьютеризированной системой контроля указанных участков с дефектами № 1 и 2 до и после гидроиспытания аппарата представлены на рис. 4, 5. Как видно из рисунков, каких-либо значительных изменений в геометрических размерах исследуемых дефектов в плоскости проката после гидроиспытания аппарата не наблюдается.

При тензометрировании использовались тензорезисторы с базой 20 мм 2ПКБ-20-200ХБ с сопротивлением $R = 198,00...198,49 \text{ Ом}$.

Для измерения деформаций применялась тензостанция ИСД-3, в которой реализована мостовая схема с питанием на постоянном токе, позволяющая осуществлять схему термокомпенсацию.

Наклейка тензорезисторов осуществлялась на наружной поверхности корпуса согласно разрабо-

танным схемам тензоизмерений (рис. 6). Поскольку цилиндрическая оболочка при нагружении внутренним давлением испытывает основное воздействие от окружающих усилий, то и монтаж датчиков выполнялся также в этом направлении. Для их наклейки применялся согласно инструкции изготовителя клей Циакрин ЭО. Перед проведением измерений выполнялась тарировка тензорезисторов. Для этого использовалась тарировочная балочка, нагружавшаяся чистым изгибом. Результаты тарировки показали, что единица изменения сопротивления тензорезистора, зафиксированное посредством тензостанции, соответствует изменению напряжения 1,86 МПа.

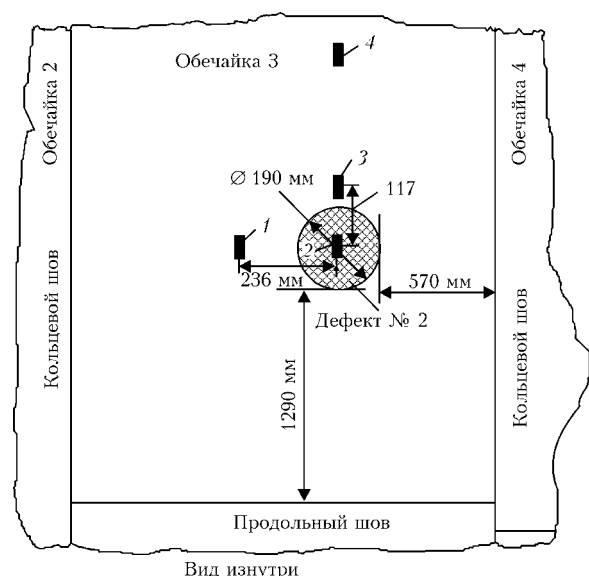


Рис. 6. Схема наклейки тензорезисторов 1-4 в зоне дефекта № 2

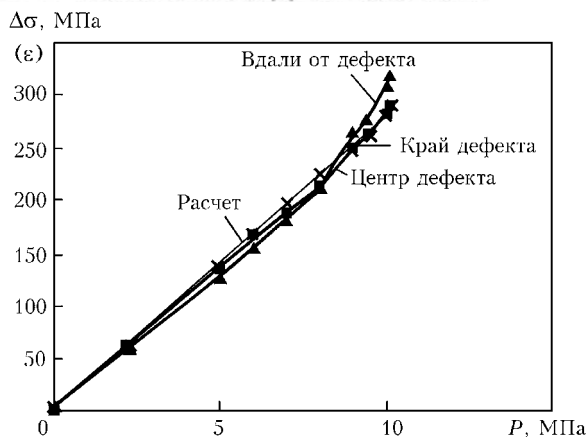


Рис. 7. Результаты тензометрирования по наружной стенке в центре, на краю и вдали от дефекта № 1

Нагружение сепаратора внутренним давлением осуществлялось поэтапно с шагом 1,0 МПа с помощью гидравлического насоса. Перед нагружением, а также после каждого этапа нагружения с выдержкой соответствующего давления не менее 5 мин осуществлялся опрос тензорезисторов с помощью переносной станции.

Измеренные изменения величины условных напряжений $\Delta\sigma$ (деформаций) на наружной стенке в центре исследуемых дефектов, на их краю и вдали от них представлены на рис. 7, 8.

Как видно из рис. 8, приращение условных напряжений (деформаций) на краю дефекта № 2 при росте гидравлического давления до 8,0 МПа практически совпадают с расчетными значениями и в 1,5 раза выше, чем в его центре. При увеличении давления свыше 8,0 МПа отмечается перелом кривой приращения условных напряжений (деформаций) для края дефекта, что косвенно свидетельствует о локальном изменении напряженно-деформированного состояния в этой области.

Определенный интерес также представляют полученные значения изменения напряжений (деформаций) в центральной части дефекта (приращение деформаций (напряжений) ниже расчетных значений на 25%), что, по всей видимости, является следствием возможного влияния изгибных моментов в данной области при нагружении аппарата [7].

Для дефекта № 1 каких-либо отклонений в приращении условных напряжений (деформаций) от расчетных не наблюдается, что косвенно свидетельствует об отсутствии резкого изменения в напряженно-деформированном состоянии в этой области в процессе нагружения (рис. 7).

Таким образом, даже исходя из предварительной оценки влияния внутреннего давления в аппарате на напряженно-деформированное состояние в зоне рассматриваемых дефектов, следует отметить его неоднозначную зависимость от геометрических размеров несплошностей и глубины их

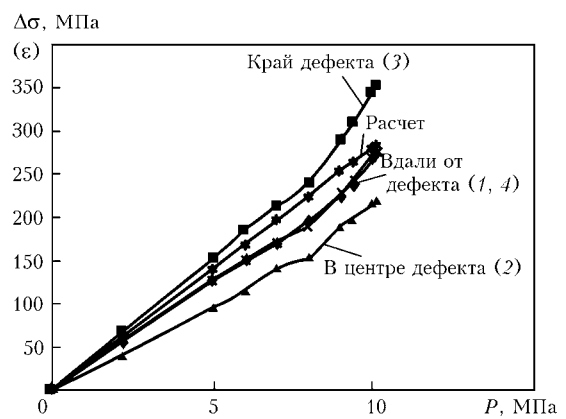


Рис. 8. Результаты тензометрирования по наружной стенке в центре, на краю и вдали от дефекта № 2 (1-4 — см. рис. 6)

залегания. Детальное рассмотрение такого влияния выходит за рамки данной работы и будет рассмотрено отдельно.

Выводы

На основе гидравлической модели выпучивания разработан упрощенный подход к оценке внутреннего давления в герметичном «пузыре» в зависимости от его геометрических размеров и глубины залегания.

Предложен критерий к допустимым размерам дефектов и представлены области их определения, которые могут быть полезны для предварительной оценки технического состояния оборудования соответствующими службами технического надзора.

Отмечено неоднозначное влияние внутреннего давления в аппарате на изменение деформированного состояния в зонах «пузырей» в зависимости от их геометрических размеров и глубины залегания.

1. *Некоторые* результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности // В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 17-24.
2. Гиренко В. С., Мутас В. В., Гиренко С. В. Прочность трубопроводов и сосудов с коррозионными выемками // Там же. — 2001. — № 4. — С. 21-23.
3. Гиренко В. С., Дядин В. П. Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // Автомат. сварка. — 1986. — № 10. — С. 61-62.
4. Балуева А. В., Дашевский И. Н. Рост водородных отслоений в металле // Изв. РАН. Механика твердого тела. — 1999. — № 1. — С. 119-123.
5. Куркин С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. — М.: Машиностроение, 1976. — 184 с.
6. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. — М.: Наука, 1966. — 635 с.
7. Концентрация напряжений на участках коррозионных повреждений трубопроводов / Э. Ф. Гарф, М. А. Нетребский, П. С. Юхимец, С. В. Кобельский // Автомат. сварка. — 2000. № 6. — С. 3-6.
8. Дядин В. П. Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Там же. — 2004. — № 4. — С. 24-29.