

тельно высокие предварительные значения предела длительной прочности, однако уже при непродолжительных сроках испытания (порядка 3000 часов) проявилось резкое снижение пластичности металла.

При металлографических исследованиях были обнаружены микротрещины на внутренней поверхности трубы.

С учетом изложенного нами принято решение о возможности временной эксплуатации труб печи риформинга в течение двух лет с последующим анализом состояния и определением остаточного ресурса.

**Список литературы:** 1. *Бояринов С.В.* Основы строительной механики машин / С.В. Бояринов. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с. 2. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.

*Поступила в редколлегию 25.03.10*

УДК 620.16.001.24

***В.М. ДОЛИНСКИЙ***, канд. техн. наук,

***В.И. ЧЕРЕМСКАЯ***, ОАО «УкрНИИхиммаш», г.Харьков, Украина

## **РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОСУДОВ, ОТРАБОТАВШИХ УСТАНОВЛЕННЫЙ РЕСУРС**

Описані методи, що дозволяють оцінити роботоздатність посудин, які відпрацювали установлений ресурс та вміщують дефекти, що виникли і розвинулись в процесі експлуатації. Наведені приклади розрахунків посудин хімічних та нафтопереробних виробництв.

Описаны методы, позволяющие оценить работоспособность сосудов, отработавших установленный ресурс и содержащих дефекты, которые возникли и развились в процессе эксплуатации. Приведены примеры расчетов сосудов химических и нефтеперерабатывающих производств.

The methods are described, allowing to estimate serviceability of the vessels fulfilled the established resource and containing defects, arisen and developed while in service. Examples of calculations of vessels of chemical oil refining manufactures are resulted.

В соответствии с нормативными материалами [1, 2] продление ресурса требует обязательного расчета на прочность. В настоящее время отсутствует систематическая нормативная база по расчету на прочность оборудования,

отработавшего установленный ресурс. Имеющиеся нормативы не всегда применяются уместно, что приводит к появлению псевдокритериев работоспособности и к перебраковке работоспособных конструкций.

Существуют десятки псевдокритериев прочности, по которым «эксперты» Украины бракуют оборудование. Остановимся на некоторых из них.

Овальность обечайки не должна быть больше  $1 \div 1,5 \%$ .

Правила [3] устанавливают эту норму из соображений технологии изготовления и сборки. Неправильно распространять это требование на условия работоспособности конструкции.

Конечно отклонение от цилиндрической формы приводит к значительному изменению напряженного состояния овальной оболочки по сравнению с идеально круглой.

Однако, окончательный ответ может дать только расчет на прочность с учетом овальности обечайки.

Условная площадь дефекта сварного шва должна быть меньше предельной чувствительности некоей эталонной площади.

ГСТУ [4] устанавливает эту норму из соображений возможного качества сварки при соответствующем уровне производства.

Конечно принятые соображения никак не гарантируют работоспособность объекта.

Ответ на вопрос дает расчет на прочность сварных соединений с имеющимися дефектами. УкрНИИхиммаш выполнял расчеты сосудов, сварные соединения которых содержат «недопустимые дефекты».

Указанные сосуды успешно эксплуатируются два десятка лет на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Толщина стенки сосуда должна быть больше расчетной толщины.

Такое требование по [5] верно, если толщина стенки элемента сосуда примерно одинакова во всех точках.

Если же произошло локальное утонение в результате избирательной коррозии или эрозии, то вопрос о допустимости такого утонения решается специальными методами.

Рассмотрим детально некоторые специальные расчеты.

### **Овальная обечайка.**

Предельное состояние конструкции наступит, когда образуются линии пластических шарниров в точках 1 и 2 (рис. 1).

Условие предельного состояния [6]:

$$(N_{1,2}/N_0)^2 + (M_{1,2}/M_0) = 1 \quad (1)$$

Условия равновесия:

$$N_1 = P \cdot a, \quad N_2 = P \cdot b, \quad M_2 = M_1 + P \cdot (a^2 + b^2)/2 - N_1 \cdot a \quad (2)$$

здесь  $N_{1,2}$ ,  $M_{1,2}$  – силы и изгибающие моменты;  $P$  – давление среды;  $N_0, M_0$  – предельная сила и предельный момент:

$$N_0 = R_e \cdot S, \quad M_0 = R_e S^2/4, \quad (3)$$

где  $R_e$  – предел текучести;  $S$  – толщина стенки.

Решение системы уравнений (1), (2) с учетом (3) позволяет получить значения предельного давления ( $P_e$ ) в функции овальности ( $\delta$ ) при различных параметрах оболочки ( $\gamma$ ) (рис. 1):

$$P_{e0} = R_e/\gamma, \quad \gamma = D/(2 \cdot S), \quad \delta = 2 \cdot (D_{max} - D_{min}) / (D_{max} + D_{min}) \quad (4)$$

здесь  $P_{e0}$  – предельное давление для круглой обечайки;  $D_{max}$ ,  $D_{min}$ ,  $D$  – максимальный, минимальный и средний диаметры обечайки:

$$P/P_{e0} = [-\delta \cdot \gamma + (\delta^2 \cdot \gamma^2 + 1 + \delta^2/4)^{1/2}] / (1 + \delta^2/4) \quad (5)$$

Полученное решение показывает, что предельная нагрузка обечайки с ростом овальности падает и даже для допустимых овальностей 1 ÷ 1,5 % она снижается заметно.

Однако, дальнейший анализ показывает, что снижение предельной нагрузки при исходной овальности не уменьшает несущую способность обечайки в запредельной области, так данная конструкция имеет способность к геометрическому упрочнению – рихтовке.

На рис. 1 приведен пример, когда исходная конструкция имеет овальность 2 %.

Если рабочее давление в аппарате  $P = 0,3 \cdot P_{e0}$  (рис. 1, точка 1), то обечайка ( $\gamma = 50$ ) не деформируется.

Если рабочее давление  $P = 0,6 \cdot P_{e0}$  (рис. 1, точка 2), то обечайка ( $\gamma = 50$ ) деформируется до нового равновесного состояния (рис. 1, точка 2<sup>1</sup>).

При этом овальность уменьшается до 1,1 %, а несущая способность ее находится на требуемом уровне ( $P = 0,6 \cdot P_{e0}$ ). Изменение овальности приводит к изменению радиусов кривизны в точках пластических шарниров.

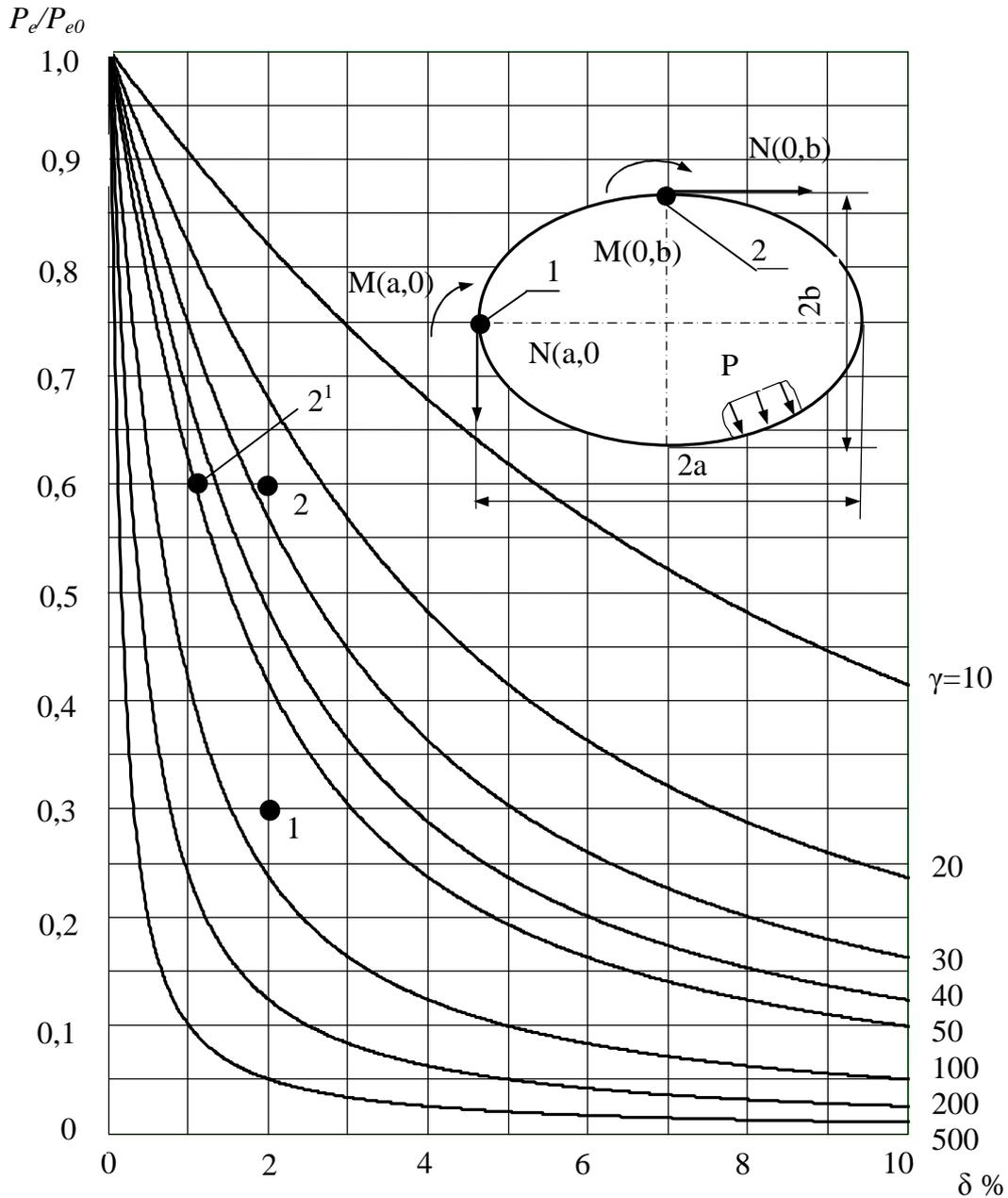


Рис. 1. Овальная обечайка

● — точки соответствуют данным из примера расчета

Это следует учесть при определении циклической прочности. Размах напряжений при полной нагрузке составляет:

$$\sigma = (P/S) \cdot (D/2 + 6 \cdot \gamma_1 \cdot b^2/S) \quad (6)$$

Значения коэффициентов  $\gamma_I = \gamma_I(\delta)$  приведены в табл. 1,  $b$  – длина малой полуоси эллипса:

$$b = 0,5 \cdot D \cdot (1 - \delta/2) \quad (7)$$

Допускаемое число циклов нагружения  $[N]$  определяют по [7] при амплитудных напряжениях  $\sigma_A = \sigma/2$

Таблица 1

Коэффициенты  $\gamma_I = \gamma_I(\delta)$

$\delta$	$\gamma_I$	$\delta$	$\gamma_I$	$\delta$	$\gamma_I$
0	0	0,02	0,01024	0,07	0,03825
0,0025	0,00127	0,025	0,01291	0,08	0,04429
0,005	0,00251	0,03	0,01556	0,09	0,05043
0,0075	0,00379	0,04	0,02104	0,1	0,05679
0,01	0,00506	0,05	0,02662	–	–
0,015	0,00765	0,06	0,03236	–	–

В рассматриваемом примере  $D=1000$  мм;  $S = 10$  мм;  $R_e = 250$  МПа; Ст. 3;  $\gamma = 50$ ;  $P_{e0} = 5,0$  МПа;  $P = 0,6 \cdot P_{e0} = 3,0$  МПа; новое значение овальности  $\delta = 0,011$  (рис. 1);  $\gamma_I = 0,00558$  (табл. 1);  $b = 497$  мм;  $\sigma = 398$  МПа (формулы 6, 7);  $[N] = 1,8 \cdot 10^4$  циклов [7].

### Сосуд с вмятиной.

Если считать, что вмятина (рис. 2) вытянута вдоль образующей обечайки (консервативная оценка), то задача сводится к подобной задаче о предельном равновесии овальной обечайки.

Решение для предельных кривых представляется подобной зависимостью:

$$P_e/P_{e0} = [-A + (A^2 + 2 \cdot B)^{1/2}] / B \quad (8)$$

здесь

$$A = \eta \cdot (2 - \eta/\gamma); \quad B = \cos^2 \alpha + (1 - \eta/\gamma)^2; \quad \eta = h_0/S; \quad \gamma = (r/S) + 0,5 \quad (9)$$

При  $P/P_{e0} > P_e/P_{e0}$  возможна рихтовка вмятины до глубины ( $h_0^*$ ), определяемой по формуле:

$$h_0^* = \gamma \cdot S \cdot \{1 - [1 + A_1/B_1]^{1/2}\}, \quad (10)$$

где

$$\lambda_1 = P/P_{e0}; \quad A_1 = \lambda_1^2 \cdot (\cos^2 \alpha + 1) - 2; \quad \cos^2 \alpha = 1 - (L/2r)^2; \quad B_1 = \lambda_1 \cdot (2 \cdot \gamma - \lambda_1) \quad (11)$$

На рис. 2 нанесены также результаты экспериментов, выполненных УкрНИИхиммашем при рихтовке сосудов внутренним давлением ( $P$ ).

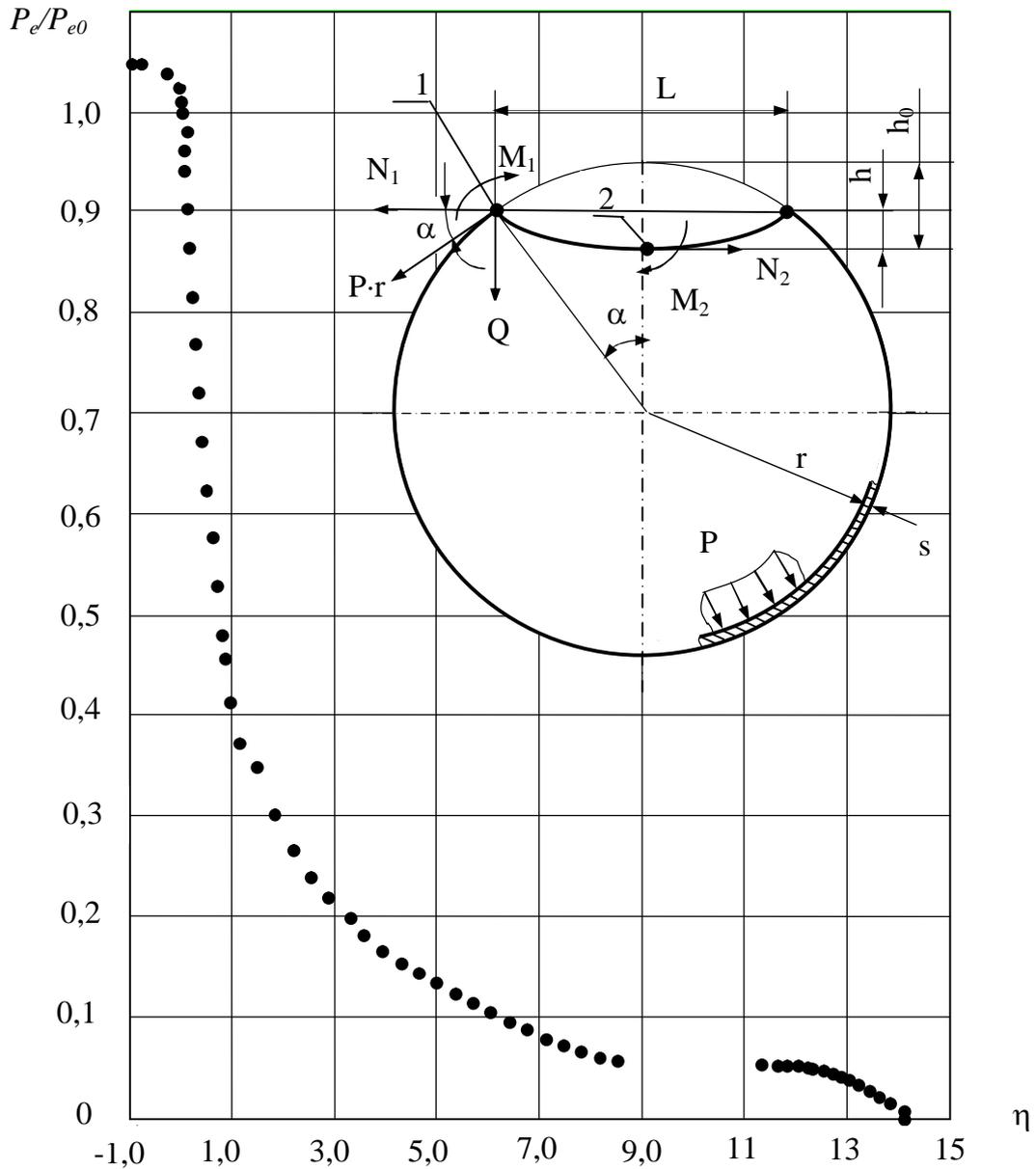


Рис. 2. Обечайка с вмятиной

— — теоретическая зависимость

● — экспериментальные точки

Результаты экспериментов удовлетворительно подтверждают теоретическую зависимость.

По описанной методике выполнены расчеты для ряда промышленных аппаратов.

Пример расчета обечайки колонны К-5, установленной на АО «Укртатнафта», имеющей вмятину глубиной  $h_0 = 50,5$  мм и шириной  $L = 1000$  мм (рис. 2).

Обечайка имеет такие исходные параметры: среда – нефтепродукты; расчетные параметры: давление  $P = 0,2$  МПа; температура  $360$  °С; внутренний радиус  $r = 2500$  мм; толщина стенки  $S = 14,6$  мм; предел текучести материала  $R_e = 206$  МПа; материал – сталь Ст. 3.

Результаты расчета (формулы 8 – 11):  $P_{e0} = 1,2$ ;  $\gamma = 172$ ;  $\eta = 3,46$ ;  $A = 6,85$ ;  $B = 1,92$ ;  $P_e/P_{e0} = 0,143$ ;  $P/P_{e0} = 0,167$ ; при  $P/P_{e0} > P_e/P_{e0}$ ;  $0,167 > 0,143$  – возможна рихтовка вмятины до глубины  $h_0^* = 43,0$  мм

Вмятина, как и следовало ожидать, не снижает несущую способность сосуда, однако следует проверить также малоцикловую прочность по [7].

Для этого необходимо выполнить расчеты с учетом измерений кривизны сосуда в местах вмятины

### **Локальное утонение стенки сосуда.**

Локальное утонение стенки сосуда (рис. 3) появляется при местной эрозии, избирательной коррозии или при расслоении стенки при водородной и сероводородной коррозии.

Очевидно, что ослабленный участок обечайки потеряет несущую способность раньше остальной обечайки.

При этом ослабленный участок выпучивается, что приводит к перераспределению напряжений.

Происходят процессы упрочнения за счет местного увеличения кривизны оболочки и процессы разупрочнения за счет увеличения диаметра ослабленного места.

Показано, что геометрическое разупрочнение преобладает, если длина повреждения ( $2l$ ) превышает диаметр сосуда.

В остальных случаях при допуске выпучивания ( $W$ ) в пределах толщины стенки возможно упрочнение ослабленного участка.

Рассматривая предельное равновесие ослабленного участка с учетом предельного шестиугольника Треска-Сен-Венана, удалось получить предель-

ную зависимость:

$$\lambda \leq [\lambda] = \{[(1 - \theta)2 \cdot (2 - \theta) + \gamma \cdot (1 - \theta)] / 2 \cdot (1 - \theta + \gamma \cdot \theta)\}^{1/2} \quad (12)$$

здесь

$$\lambda = l / (D \cdot S_p)^{1/2}; \quad \theta = (S_p - S_1) / S_p; \quad \gamma = D / (2 \cdot S_p) \quad (13)$$

$S_p$  – расчетная толщина стенки;  $\alpha$  – угловая координата повреждения.

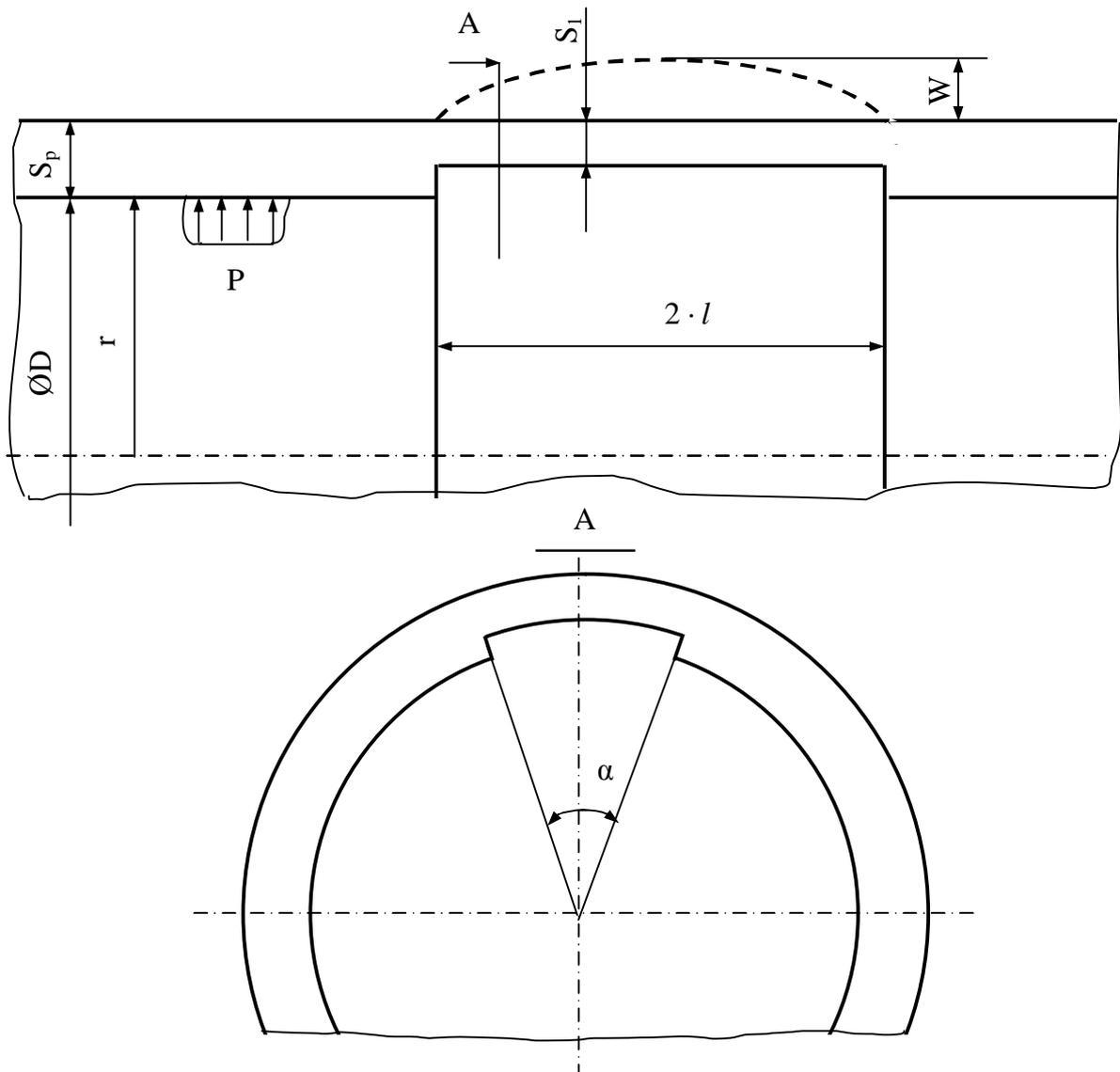


Рис. 3. Обечайка с поврежденной стенкой

Допускаемый угол повреждения  $[\alpha]$  определяется из условия:

$$2 \cdot \cos\{([\alpha] \cdot \theta + \pi) / 4\} = \theta \cdot \sin\{[\alpha] / 2\} \quad (14)$$

Полученные зависимости представлены на рис. 4, где пунктирной линией показана эмпирическая кривая [8], полученная при обработке 260 лабораторных и промышленных испытаний труб с параметром ( $\gamma$ ) в пределах от 4,5 до 70.

Полученные результаты достаточно хорошо совпадают.

Отличие наблюдается при больших значениях ( $\gamma$ ), характерных для обечаек сосудов.

Далее приведены расчеты двух промышленных аппаратов.

### **Пример № 1.**

Ресивер аммиака поз. D-4С установлен на Одесском припортовом заводе.

Исходные данные: среда – аммиак; расчетные параметры:  $P = 2,0$  МПа;  $t = 51,7$  °С; материал – сталь SA516Gr70 (отечественный аналог – сталь 30);  $D = 1524$  мм;  $S_p = 13,0$  мм;  $2l = 150$  мм;  $S_l = 11,2$  мм;  $\alpha = 37,6$  град (рис. 3) .

Результаты расчета.

Параметры:  $\gamma = 58,6$ ;  $\lambda = 0,533$ ;  $\theta = 0,138$ ;  $[\lambda] = 1,70$ ;  $[\alpha] = 360$  град;  $\lambda < [\lambda]$ ,  $0,533 < 1,70$ ;  $\alpha < [\alpha]$ ;  $37,6$  град  $< 360$  град – рассматриваемый дефект является допускаемым.

### **Пример №2.**

Холодильник X-401, установлен на АО «Укртатнафта».

Исходные данные: среда фракция пентана; расчетные параметры:  $P = 3,3$  МПа;  $t = 100$  °С; материал – сталь 16ГС;  $D = 500$  мм;  $S_p = 5,7$  мм;  $2l = 780$  мм;  $S_l = 4,4$  мм;  $\alpha = 68,8$  град (рис. 3)

Результаты расчета.

Параметры:  $\gamma = 43,9$ ;  $\lambda = 7,3$ ;  $\theta = 0,228$ ;  $[\lambda] = 1,27$ ;  $[\alpha] = 360$  град;  $\alpha < [\alpha]$ ;  $68,8$  град  $< 360$  град;  $\lambda > [\lambda]$ ,  $7,3 > 1,27$  – рассматриваемый дефект является недопускаемым.

На рис. 4 нанесены результаты расчета двух промышленных аппаратов (примеры № 1, № 2).

Каждый из сосудов характеризуется отрезком прямой.

Если отрезок лежит внутри области, ограниченной кривыми  $[\lambda](\theta)$ ,  $[\alpha](\theta)$ , то дефект является допускаемым (пример № 1), в противном случае дефект является недопускаемым, требуется ремонт (пример № 2).

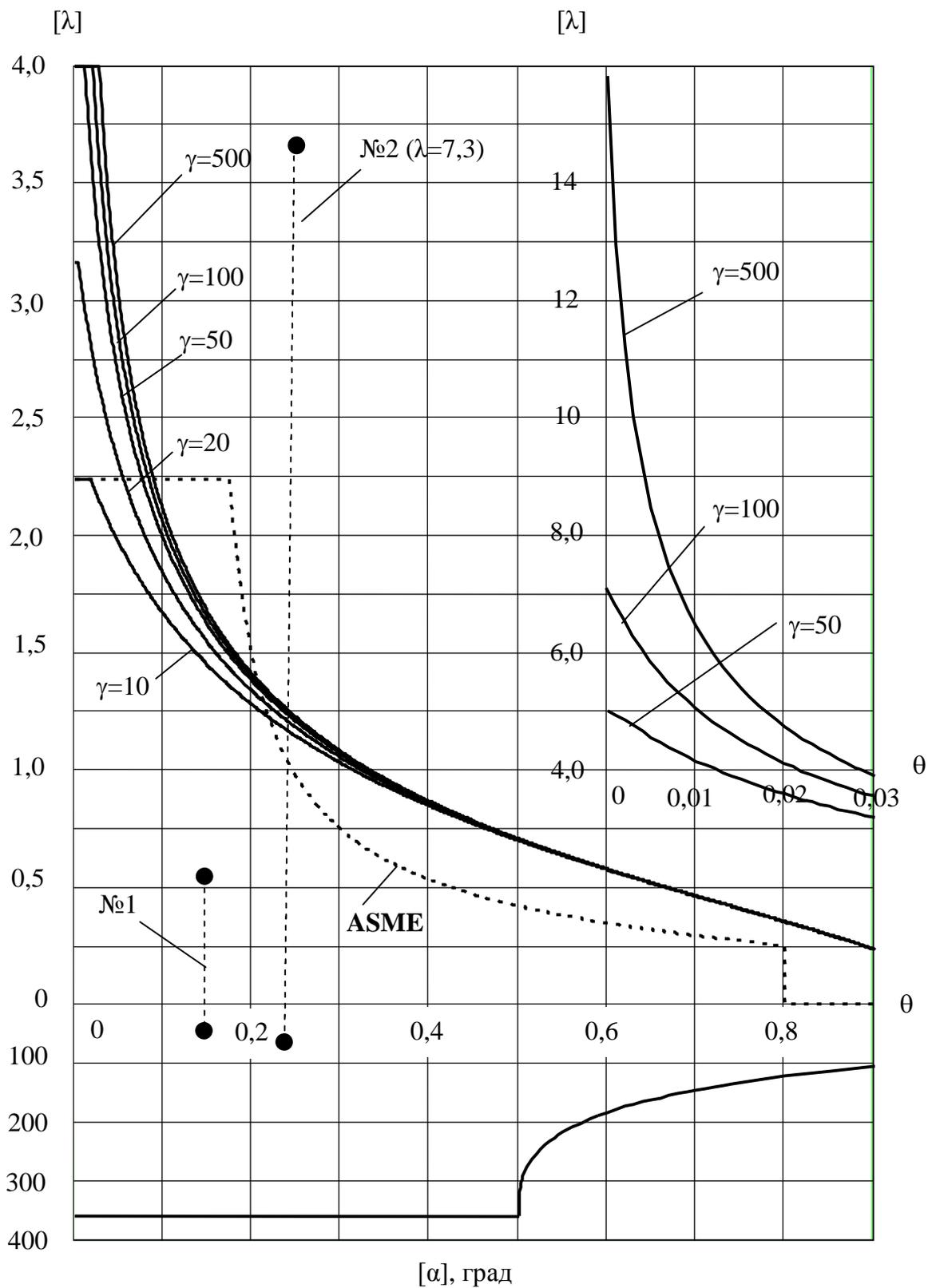
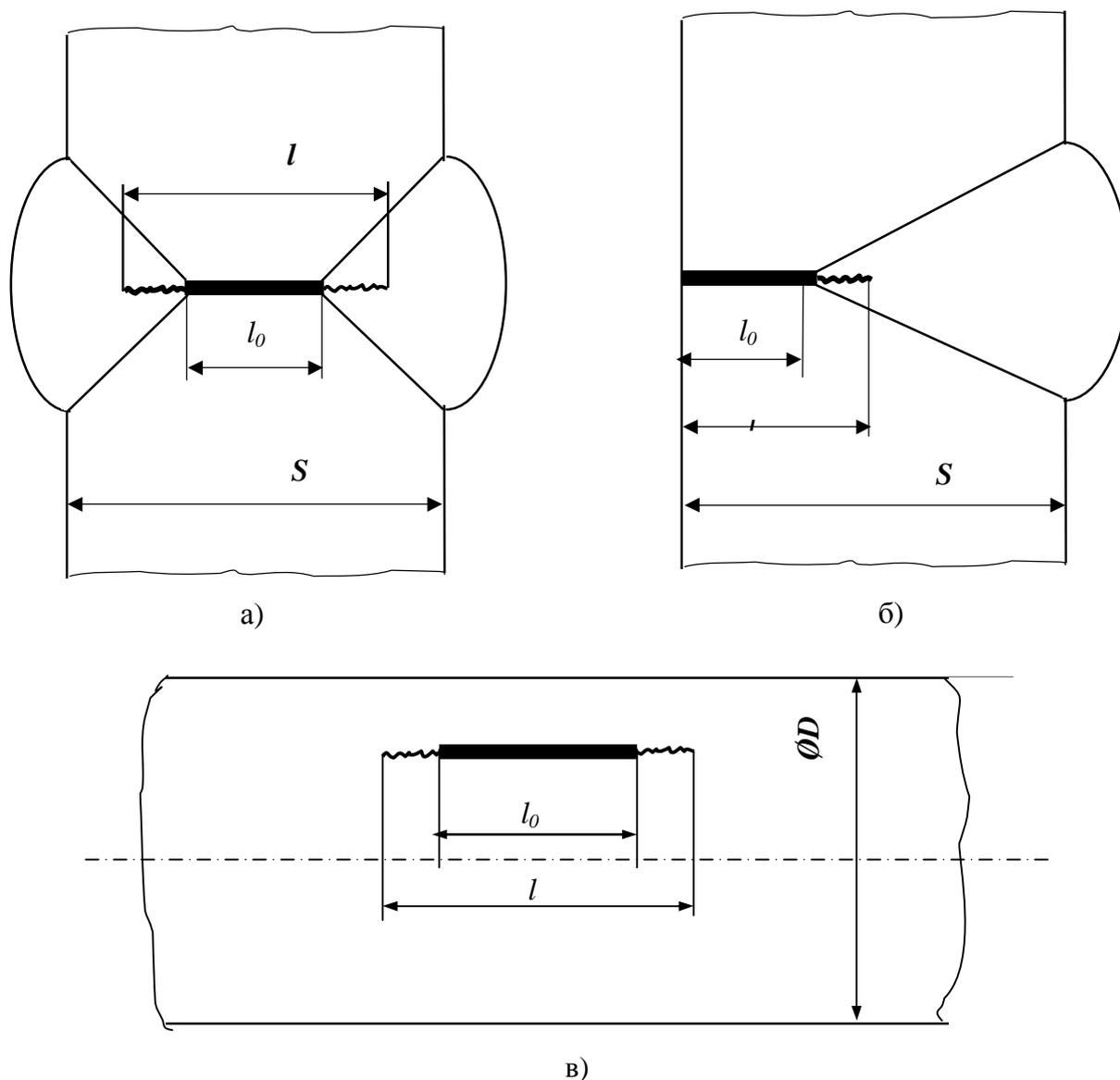


Рис. 4. Допускаемые параметры повреждения стенки сосуда:  
 – зависимость ОАО «УкрНИИХиммаш»;                      – зависимость ASME

### Трещины и трещиноподобные дефекты.

Непровары и несплавления являются типовыми примерами трещиноподобных дефектов. В редких случаях встречается необходимость эксплуатации сосудов и трубопроводов со сквозными дефектами. Основные случаи возможных дефектов представлены на рис. 5.



а)

б)

в)

Рис. 5. Дефекты:

- а) внутренний непровар; б) поверхностная трещина;
- в) сквозная трещина вдоль образующей обечайки.

Расчеты конструкций с трещинами выполняются с применением механики разрушения [9]. При этом возможны различные механизмы разрушения: хрупкий, вязкий и квазихрупкий. Случай сквозной трещины предусмат-

ривает хрупкое или квазихрупкое разрушения – в этом случае применима линейная механика разрушения.

В случаях непровара возможны как хрупкий так и вязкий механизмы разрушения.

В последнем случае необходимо пользоваться нелинейной механикой разрушения.

Воспользовавшись критерием Ирвина-Орована можно установить область вязкого разрушения:

$$S < \beta \cdot \{K_{Ic}(K_{Isc}/R_e)\}^2 \quad (14)$$

здесь  $K_{Ic}$ ,  $K_{Isc}$  – вязкость разрушения в нейтральной и агрессивных средах;  $\beta$  – параметр зоны пластичности.

Если ограничиться нейтральной средой, то для основных ходовых сталей можно установить предельные значения, при которых разрушение будет вязким (табл. 2).

Таблица 2

Предельные значения толщин

Марка стали	Ст3	09Г2С	12Х18Н10Т
$K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	36,5÷48,5	45,6÷48,3	30,0÷40,3
$R_e$ , МПа	264	355	280
$\beta$	2,5	2,5	5,0
$S$ , мм	47,9÷84,4	41,3÷46,3	57,5÷104

### Расчеты в рамках линейной теории разрушения.

Статическая прочность определяется условием:

$$K \leq K_{Ic}(K_{Isc}) / [n_k] \quad (15)$$

здесь  $K$  – коэффициент интенсивности напряжений ( $K_{IIN}$ );  $[n_k]$  – допускаемый запас трещиностойкости.

$K_{IIN}$  определяют по формуле:

$$K = Y \cdot \sigma_n \cdot (\pi \cdot l) \quad (16)$$

здесь  $\sigma_n$  – номинальные нормальные напряжения;  $l$  – линейный размер тре-

щины;  $Y$  – фактор формы, определяется геометрией конструкции и положением трещины.

Значения  $Y$  для трех, указанных на рис. 5 случаев следующие:

- внутренний непровар (рис. 5 а)

$$Y = \{ [S/(\pi \cdot l)] \cdot \text{tg}[\pi \cdot l / (2 \cdot S)] \}^{1/2} \quad (17)$$

- поверхностная трещина (рис. 5 б)

$$Y = [1,11 + 5 \cdot (l/S)^4] / (1 - l/S) \quad (18)$$

- сквозная трещина вдоль образующей обечайки (рис. 5 в)

$$Y = \{ 1/2 + 1,61 \cdot l^2 / (4 \cdot D \cdot S) \}^{1/2} \quad (19)$$

Скорость роста трещины:

$$dl/dN = C \cdot (\Delta K)^m \quad (20)$$

здесь  $l$  – длина трещины;  $N$  – число циклов нагружения;  $\Delta K$  – размах КИН;  $C$  и  $m$  – параметры Пэриса.

В рамках нелинейной теории разрушения статическая прочность определяется условием:

$$\sigma \leq R_m / [n_m] \quad (21)$$

здесь  $R_m$  – предел прочности;  $[n_m]$  – допускаемый запас прочности.

Скорость роста трещины в этом случае определена в результате обработки большого числа экспериментальных исследований УкрНИИхиммаша на ходовых сталях и представляется зависимостью:

$$dl/dN = A \cdot (\Delta\sigma - \sigma_0)^2 \quad (22)$$

здесь  $\sigma_0$  – пороговое напряжение, ниже которого трещина не растет;  $\Delta\sigma$  – размах напряжений;  $A$  – параметр, представленный в табл. 3

Значения скорости могут быть также получены из табл. 4 в зависимости от напряжений в ослабленном сечении и с учетом коэффициентов стеснения

деформаций ( $K_\Sigma$ ) и температурного коэффициента ( $K_t$ ):

$$K_\Sigma = 1 + (1 - \mu^2)^{-m/2}; \quad K_t = 1 + (t - 20)/330 \quad (23)$$

здесь  $\mu \leq 0,5$  – коэффициент Пуассона;  $t$  – расчетная температура.

По предложенной методике выполнены расчеты аппаратов.

Таблица 3

Параметры  $A$  и  $\sigma_0$

Марка стали	Трещина внутренняя		Трещина краевая	
	$A, \text{мм} \cdot \text{МПа}^2/\text{цикл}$	$\sigma_0, \text{МПа}$	$A, \text{мм} \cdot \text{МПа}^2/\text{цикл}$	$\sigma_0, \text{МПа}$
Ст3	$0,176 \cdot 10^{-7}$	75	$0,675 \cdot 10^{-7}$	60
09Г2С	$0,242 \cdot 10^{-7}$	90	$0,692 \cdot 10^{-7}$	45
12Х18Н10Т	$0,608 \cdot 10^{-7}$	70	$0,722 \cdot 10^{-7}$	30

Таблица 4

Скорость роста трещины  $10^3 \cdot V, \text{мм}/\text{цикл}$

$\sigma, \text{МПа}$	Трещина внутренняя			Трещина краевая		
	Материал – сталь			Материал – сталь		
	Ст3	12Х18Н10Т	09Г2С	Ст3	12Х18Н10-Т	09Г2С
450÷400	9,3	28,1	9,36	–	–	–
400÷350	5,13	17,8	7,40	–	–	–
350÷300	3,66	15,2	4,70	17,9	21,4	19,3
300÷250	2,19	9,15	2,01	11,3	9,50	14,9
250÷200	1,12	3,06	1,25	8,37	7,30	10,3
200÷150	0,930	1,42	0,481	3,25	4,34	5,73
150÷ $\sigma_0$	0,465	0,356	0,295	1,12	3,03	2,14
$\leq \sigma_0$ (табл. 3)	0	0	0	0	0	0

### Пример № 1.

Расчет на статическую прочность трубопровода Одесского припортового завода, имеющего сквозную трещину в осевом направлении длиной  $l = 60$  мм.

Исходные данные: рабочая среда – конвертированный газ; расчетные параметры:  $P = 3,04$  МПа;  $t = 482$  °С; наружный диаметр трубы  $D_n = 609,6$  мм; толщина стенки по результатам измерений  $S_u = 12,3$  мм; прибавка на коррозию  $C = 0,16$  мм; вязкость разрушения  $K_{Ic} = 2,0$  кН/мм<sup>3/2</sup>; коэф-

коэффициент запаса трещиностойкости  $[n_k] = 1,75$ ; материал – сталь +Sa155GrCM70 (отечественный аналог – сталь 15ХМ).

Результаты расчета (формулы 15, 16, 19).

Прогноз возможного вида разрушения – возможно квазихрупкое разрушение.

$\sigma_n = 75,0$  МПа;  $Y = 0,837$ ;  $K = 0,862$  кН/мм<sup>3/2</sup>;  $[K_{Ic}] = 1,143$  кН/мм<sup>3/2</sup>;  $K < K_{Ic}$ ;  $0,862$  кН/мм<sup>3/2</sup>  $< 1,143$  кН/мм<sup>3/2</sup>; допускаемая длина трещины при  $K = [K_{Ic}] = 1,143$  кН/мм<sup>3/2</sup> не должна превышать величины  $[l] = 83,3$  мм

### Пример № 2.

Расчет на циклическую прочность обечайки маслоотделителя с внутренним непроваром ( $l = 3,0$  мм) в продольном сварном шве.

Исходные данные: рабочая среда – пропан; расчетные параметры: давление  $P = 2,5$  МПа; температура  $t = 167$  °С; размах колебания давления  $\Delta P = 2,5$  МПа; число нагружений в год  $n = 4$ ; внутренний диаметр сосуда  $D = 606$  мм; толщина стенки по результатам измерений  $S_u = 10,6$  мм; прибавка на коррозию  $C = 0,6$  мм; вязкость разрушения  $K_{Ic} = 22,0$  МПа·м<sup>1/2</sup>; предел текучести материала при нормальной температуре  $R_e^{20} = 224$  МПа; временное сопротивление материала при расчетной температуре  $R_m^t = 425$  МПа; материал – сталь Ст. 3;  $\beta = 2,5$ ; назначенный срок службы  $\tau_n = 6,0$  лет.

Результаты расчета.

$[S] = 24,1$  (формула 14);  $S_u - C < [S]$ ;  $10,0$  мм  $< 24,1$  мм – возможно вязкое разрушение;  $\sigma_n = 110$  МПа [5] – в сечении, ослабленном дефектом; скорость роста дефекта (табл. 4) –  $V = 0,000465$  мм/цикл.

Приращение внутреннего дефекта в течении назначенного срока службы незначительно ( $0,022$  мм);  $\sigma_n < R_m^t$ ;  $110$  МПа  $< 425$  МПа – условие циклической прочности выполнено.

### Выводы.

На основании выполненных расчетов сотни аппаратов в химической и нефтеперерабатывающей промышленности успешно работают с так называемыми «недопустимыми» дефектами.

Постоянный периодический контроль показал практическую доброкачественность предложенной методики.

Описанные в данной статье методы могут быть применены для обоснованной оценки работоспособности сосудов с дефектами.

**Список литературы:** **1.** Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги; ДСТУ 4046-2001. – [Чинний від 27.07.2001]. – К.: Держстандарт України, 2001. – 24 с. **2.** Проведение работ по оценке остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. Методические указания; НПАОП 0.00-7.02-93. – [Утвержден 19.05.1993]. – К.: Госнадзорхрантруда, 1993. – 56 с. **3.** Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском; НПАОП 0.00-1.07-94. – [Затверджено 18.10.94. №104]. – К.: Держнаглядохоронпраці, 1998. – 373 с. **4.** Посудини та апарати, що працюють під тиском. Методика ультразвукового контролю зварних з'єднань; ДСТУ 3-037-2003. – [Чинний від 2004-01-2001]. – К.: Мінпромполітики України, 2003. – 104 с. **5.** Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность; ГОСТ 14249-89. – [Дата введения 01.01.1990]. – Издательство стандартов, 1989. – 79 с. **6.** Прикладная теория пластичности и ползучести / *Н.Н. Малинин*. – М.: «Машиностроение», 1968. – 400 с. **7.** Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках; ГОСТ 25859-83. – [Дата введения 01.07.1984]. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 30 с. **8.** Инструкция для трубопроводов под давлением. Американский национальный стандарт. Руководство для определения остаточной прочности трубопроводов, подвергшихся коррозии; ASME B31G-1991. – Американское общество инженеров-механиков. **9.** Методика расчета сварных соединений сосудов, содержащих дефекты. – Харьков: ОАО «УкрНИИхиммаш», 2004.

*Поступила в редколлегию 25.03.10*