

Результаты испытаний трубных образцов с надрезами в рамках экспериментального обоснования явления “течь перед разрушением”

И. В. Орыняк^а, Н. И. Власенко^б, В. Я. Козлов^б, Я. А. Андриешин^в,
Э. В. Чечин^а, К. П. Буйских^а, С. М. Агеев^а, О. А. Янко^а

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б ГП НАЭК “Энергоатом” ОП “Научно-технический центр”, Киев, Украина

^в ООО “ИПП-Центр”, Киев, Украина

Модернизировано экспериментальное оборудование и сформулированы требования к геометрическим размерам надрезов трубных образцов. Проведена серия испытаний до разрушения при нагружении внутренним давлением и изгибающим моментом прямых трубных образцов с продольными и поперечными поверхностными надрезами, а также трубного отвода с продольным поверхностным надрезом. Экспериментальные данные сравниваются с теоретическими расчетами. Теоретически спрогнозирована и экспериментально обоснована условная граница между “течью” и “разрушением” при нагружении внутренним давлением прямой трубы с продольным поверхностным дефектом.

Ключевые слова: течь перед разрушением, трубный образец, продольный и поперечный дефекты, остаточная прочность, внутреннее давление, изгибающий момент.

Введение. В последнее время концепция “течь перед разрушением” (ТПР) получила широкое применение как критерий оценки или повышения безопасности АЭС. Концепция ТПР обусловлена принципами проектирования АЭС исходя из решения вопросов разрушения трубопроводов и их безопасности. Ее используют в качестве частичного смягчения требований, касающихся анализа двухстороннего гильотинного разрушения трубопроводов (ДГРТ). Суть концепции состоит в том, что гипотетическая поверхностная трещина в трубе при ее возможном развитии до сквозной не приведет к катастрофическому разрушению трубопровода, поскольку материал может сопротивляться большим сквозным дефектам для заданной системы нагрузок и имеются технические средства к обнаружению течи.

Применение концепции ТПР позволяет отказаться от установки дополнительных опор, ограничителей биений труб, защитных экранов, за исключением защитных оболочек, систем аварийного охлаждения активной зоны реактора и локализации аварий. Концепция ТПР подтверждается опытом эксплуатации и расчетно-экспериментальными исследованиями, которые показывают очень малую вероятность ДГРТ даже при тяжелых аварийных нагрузках.

Отметим, что разработка концепции ТПР началась еще в 1976 году, когда в США приобрела актуальность проблема обоснования целостности реактора при действии на него возможного несимметричного нагружения, вызванного осевой силой и нагрузками от давления при гильотинном разрушении патрубка реактора. Результатом последовавших исследований было создание кон-

цепции ТПР, принятой в 1984 году, как средство демонстрации того, что необходимость в установке дополнительных закреплений реактора отсутствует. Концепция была законодательно утверждена в 1987 году в Федеральном законе США [1], а также в документе [2], позволяющем оценить безопасность действующих и проектируемых АЭС. Его разработке предшествовала большая аналитическая и исследовательская работа.

В 1974 году [3] в Институте Баттеля был разработан первый критерий допустимости коррозионных дефектов в нефте- и газотрубопроводах, предназначенный в первую очередь для оценки продольных поверхностных трещин прямоугольной формы и описывающий предельное состояние при вязком разрушении (limit load). Позже сотрудниками этого института была предложена аналогичная формула для продольных сквозных трещин. Для обоснования формул проведено более 100 полномасштабных экспериментов по разрушению труб с искусственно нанесенными трещинами. Эти формулы до настоящего времени наиболее используются в различных индустриях при оценке остаточной прочности труб с продольными дефектами [4, 5], хотя предпринимаются попытки их уточнения и пересмотра [6].

Учитывая, что в трубопроводах кипящих атомных реакторов (BWR) имеет место значительное количество окружных трещин, возникших по механизму коррозии под напряжением (КПН), в Институте Баттеля в конце 70 годов была проведена большая исследовательская работа по установлению критериев допустимости поперечных трещин. В результате был создан так называемый критерий отказа по нетто-сечению (net-section-collapse, NSC), основанный на теории предельного состояния, согласно которой материал обладает достаточно высокой вязкостью, и начало распространения трещины зависит от прочности материала, ее формы и размеров, а также размеров трубы [7–9].

Физической предпосылкой применимости указанной концепции является наблюдаемое явление “течи перед разрушением”, когда локальный разрыв нетто-связки поверхностного дефекта не приводит к катастрофическому разрушению образовавшегося сквозного дефекта. Формальным объяснением явления может быть сравнительный анализ формул, полученных в Институте Баттеля для продольных трещин (поверхностной и сквозной). Для очень глубокой поверхностной трещины остаточная прочность согласно формуле для поверхностной трещины стремится к нулю, в то время как в соответствии с формулой для сквозной трещины она отличается от нуля. Если же рассматривать очень мелкую трещину, то согласно этим формулам очевидно, что остаточная прочность в первом случае выше, чем во втором. Поскольку обе формулы являются монотонными функциями, очевидно, что для поверхностных трещин существуют критические остаточные толщины стенок, при которых прочность поверхностного и сквозного дефектов одинаковой длины равна. Таким образом, если давление в трубе с поверхностной трещиной достигает критического значения и остаточная толщина стенки меньше критической, то после развития поверхностной трещины до сквозной ее дальнейшее развитие останавливается, поскольку прочность сквозной трещины выше прочности поверхностной. В этом состоит физическая суть явления “течи перед разрушением”.

В Украине национальная нормативная база по реализации концепции ТПР отсутствует. Однако в соответствии с требованиями [10] “на энергоблоках АЭС должна быть реализована концепция течи перед разрушением”. В 2009–2010 годах разрабатывались документы [11, 12], в рамках которых проведена серия полномасштабных испытаний трубных образцов с надрезами с целью экспериментального обоснования физической сути ТПР и применяемых методик оценки остаточной прочности. В указанных документах использовались разработанные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины (далее – ИПП) современные методы оценки остаточной прочности элементов трубопроводов с трещинами (продольными [13, 14] и поперечными [15]).

Цель настоящей работы – описание основных результатов испытаний, проведенных в соответствии с требованиями [16] на пневмогидравлическом стенде, позволяющем нагружать внутренним давлением газа до 100 МПа и давлением жидкости до 200 МПа сосуды диаметром до 700 мм и длиной до 2000 мм, а также на испытательной машине Р-10, обеспечивающей программное изменение растягивающей (сжимающей) нагрузки в диапазоне 0...10 т.

Испытания прямых трубных образцов с продольными надрезами при нагружении внутренним давлением проводили на пневмогидравлическом стенде. *Объектом испытаний* служили семь прямых трубных образцов (сталь 20) длиной $L=1000$ мм, наружным диаметром $D=194$ мм и толщиной стенки $t=9$ мм (рис. 1) с предварительно нанесенными на расстоянии $L/2$ поверхностными продольными надрезами различного типоразмера (табл. 1). Надрезы наносили дисковой фрезой диаметром 80 мм, толщиной 3 мм и углом заточки 45° . К торцам трубных образцов приваривали плоские доньшки 1 со штуцерами 2, через которые осуществляли подвод внутреннего давления (рис. 1).

Т а б л и ц а 1

Геометрические характеристики продольных надрезов

№ трубного образца	Глубина надреза $(t - t_n)$, мм	Длина надреза l , мм	Горизонтальное перемещение дисковой фрезы l_ϕ , мм
1	7,4	64,0	32,5
1а		119,0	87,5
2	6,6	64,0	34,1
4		119,0	89,1
5		37,0	7,1
3	5,8	64,0	36,0
3а		119,0	91,0

Методика испытаний. Трубные образцы, предварительно заполненные на 100% объема водой, нагружали внутренним давлением воздуха, создаваемым компрессором КЛ-10/1000, до разрушения. В режиме реального времени посредством тензометров, откалиброванных микрометром G1-55 с базой 50 мм, регистрировали внутреннее давление и величину раскрытия берегов надрезов.

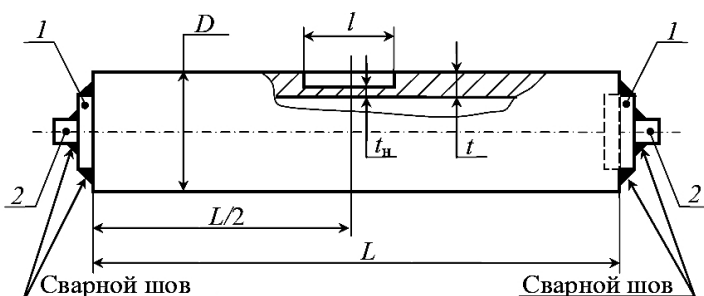


Рис. 1. Трубный образец с продольным надрезом.

Технология нанесения надреза. Рассмотрим схему нанесения надреза на трубный образец (рис. 2). Очевидно, с уменьшением диаметра фрезы форма надреза будет приближаться к прямоугольной. Поскольку процесс нанесения надреза с помощью фрезы малого диаметра с технологической точки зрения невозможен, в любом случае форма надреза будет отличаться от прямоугольной. С учетом этого оперировали понятием длины надреза l (рис. 1), определяемой по его эквивалентному сечению:

$$l = l_{\phi} + \Delta l, \quad (1)$$

где l_{ϕ} – горизонтальное перемещение дисковой фрезы; Δl – приращение длины надреза за счет площади сектора технологического заглупления S дисковой фрезы,

$$\Delta l = S / (t - t_n). \quad (2)$$

Площадь S определяется по формуле

$$S = R_{\phi}^2 \arccos\left(\frac{R_{\phi} - (t - t_n)}{R_{\phi}}\right) - [R_{\phi} - (t - t_n)] \sqrt{R_{\phi}^2 - [R_{\phi} - (t - t_n)]^2}, \quad (3)$$

где R_{ϕ} – радиус дисковой фрезы.

Выбор размеров надреза. На рис. 3 показана условная расчетная граница между областями “течи” и “разрушения” в координатах безразмерная толщина нетто-сечения t_n/t – безразмерная длина надреза $\lambda = l/2\sqrt{Rt}$, где R – средний радиус трубного образца. Границу определяли в соответствии с [13]. Безразмерный коэффициент уменьшения прочности трубы с продольным поверхностным дефектом α_n определяется так:

$$\alpha_n = \frac{1 + 2\lambda^2\tau(1 - \tau)}{1 + 2\lambda^2(1 - \tau)}, \quad (4)$$

где τ – безразмерная толщина нетто-сечения, $\tau = t_n/t$; коэффициент α_n показывает, во сколько раз остаточная прочность трубы с продольным поверхностным дефектом меньше прочности бездефектной.

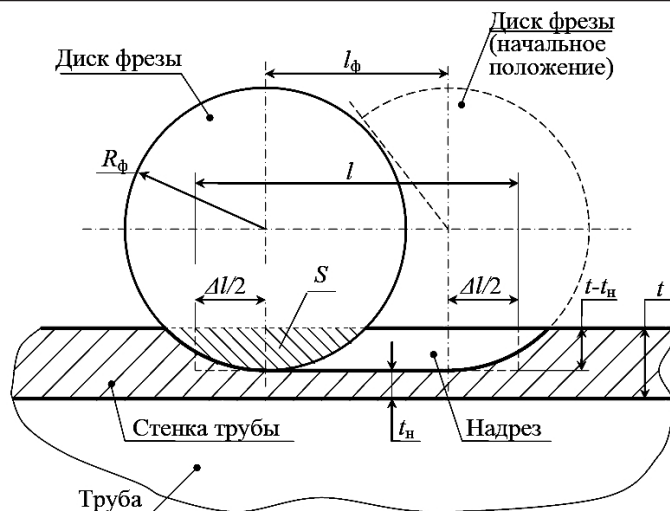


Рис. 2. Схема нанесения продольного надреза на трубный образец.

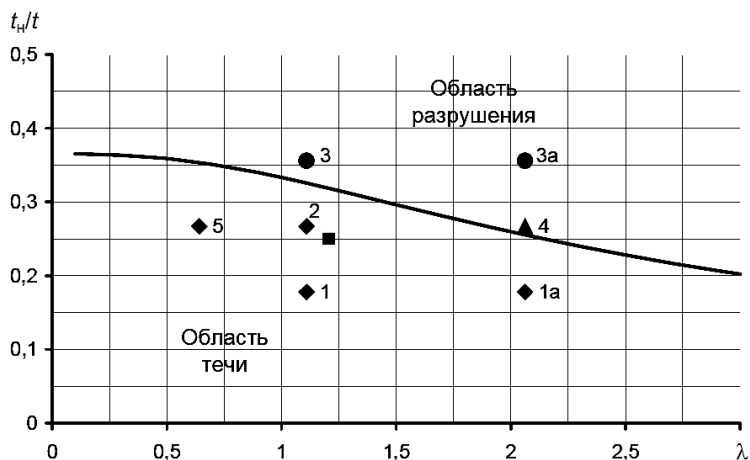


Рис. 3. Условная расчетная граница между областями течи и разрушения прямых трубных образцов $\varnothing 194 \times 9$ мм и трубного отвода $\varnothing 219 \times 12$ мм с продольными надрезами.

Остаточная прочность трубы с продольным сквозным дефектом α_c может быть определена по формуле [5, 17]

$$\alpha_c = 1/\sqrt{1 + 1,61\lambda^2}. \quad (5)$$

На основании проведенного в [13] анализа из условия

$$\alpha_{\Pi} = \alpha_c \quad (6)$$

определяется критическое значение $\tau_{кр}$, соответствующее границе между областями течи и разрушения.

Размеры надрезов выбраны таким образом, чтобы в результате испытаний получить два вида потери несущей способности трубных образцов:

течь – проращение поверхностного дефекта до сквозного с последующей остановкой его развития; разрушение – проращение поверхностного дефекта до сквозного, сопровождающееся увеличением его размеров в продольном и поперечном направлении. Кроме того, выбранные размеры надрезов позволяют, как видно из рис. 3, получить точки, расположенные в непосредственной близости к условной границе. Точки 3 и 3а, расположенные выше условной границы, соответствуют области ожидаемых разрушений, точки 1, 1а, 2, 5, расположенные ниже – области ожидаемой течи. Точка 4 находится в области условной границы.

Результаты теоретических расчетов и эксперимента. При теоретических расчетах с помощью формул [3] и [13] определяются коэффициент уменьшения прочности α , предельное давление (давление разрушения) P и ссылочные напряжения σ_{ref} , характеризующие предельное состояние трубы с надрезом для заданной системы нагрузок (степень нагруженности).

1. По формуле, полученной сотрудниками Института Баттеля (далее – ИБ) (“локальное” решение) [3]:

$$\alpha_{ИБ} = \frac{\tau}{1 - (1 - \tau)/(1 + 1,61\lambda^2)^{0,5}}; \quad (7)$$

$$P_{ИБ} = \alpha_{ИБ} \sigma_{в} t / R; \quad (8)$$

$$\sigma_{ref}^{ИБ} = P_{э} R / (\alpha_{ИБ} t), \quad (9)$$

$\sigma_{в}$ – предел прочности; $P_{э}$ – экспериментальное значение внутреннего давления разрушения. В качестве характеристики материала принят предел прочности, в то время как в работе [3] предложено среднее значение между пределами прочности $\sigma_{в}$ и текучести $\sigma_{т}$: $\sigma_f = 0,5(\sigma_{в} + \sigma_{т})$.

2. Коэффициент α определяется согласно (4), давление разрушения и ссылочные напряжения – следующим образом:

$$P_{ИПП} = \alpha_{п} \sigma_{в} t / R, \quad (10)$$

$$\sigma_{ref}^{ИПП} = P_{э} R / \alpha_{п} t. \quad (11)$$

Для установления реального предела прочности материала $\sigma_{в}$ трубных образцов проведены испытания пятикратных цилиндрических образцов на растяжение [18], вырезанных как в продольном, так и поперечном направлении. Получен следующий диапазон значений: $\sigma_{в} = 422...433$ МПа.

В табл. 2 представлены результаты сопоставления экспериментальных данных с теоретическими расчетами по формулам, полученным в [3] и [13]. Отметим, что при определении предельного давления ($P_{ИБ}$, $P_{ИПП}$) значение предела прочности принято 427,5 МПа. Соответствующее ему расчетное значение давления разрушения бездефектного трубного образца $P_{т}^{\sigma} = \sigma_{в} t / R = 41,6$ МПа. На рис. 4 графически представлены экспериментальные и теоретические данные по типу потери несущей способности – течь, разрушение.

Т а б л и ц а 2

Результаты сопоставления экспериментальных данных с теоретическими для образцов $\varnothing 194 \times 9$ мм с продольными надрезами

№ трубного образца	P , МПа	$\alpha_{ИБ}$	$P_{ИБ}$, МПа	$\sigma_{ref}^{ИБ}$, МПа	α_{II}	$P_{ИПП}$, МПа	$\sigma_{ref}^{ИПП}$, МПа	Δ_{max} , мм
1	21,9	0,339	14,1	663,1	0,45	18,7	500,2	1,294
1a	11,7	0,252	10,5	477,9	0,281	11,7	427,9	0,732
2	23,0	0,464	19,3	509,9	0,528	22,0	447,7	1,359
4	15,8	0,361	15,0	449,5	0,368	15,3	441,3	1,008
5	29,8	0,619	25,7	495,2	0,724	30,1	423,0	2,162
3	23,1	0,567	23,6	418,5	0,605	25,2	392,4	1,415
3a	20,4	0,462	19,2	454,0	0,455	18,9	460,8	1,460

Примечание. Δ_{max} – максимальное раскрытие берегов надреза.

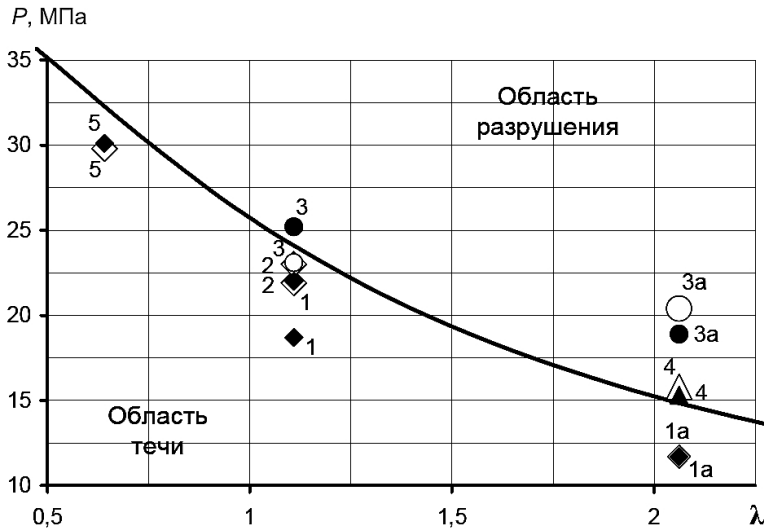


Рис. 4. Графическое представление экспериментальных (светлые точки) и теоретических (темные точки) данных по типу потери несущей способности – течь, разрушение. (Цифры соответствуют номерам образцов в табл. 2.)

Известно, что расчет по локальной модели (7) приводит к заниженным результатам ввиду ее эмпирической природы. Даже несмотря на то что при расчете $P_{ИБ}$ в качестве предельной характеристики использовался предел прочности, результаты оказались ниже, полученных по формуле (4), о чем свидетельствуют данные табл. 2.

Испытания прямых трубных образцов с поперечными надрезами при нагружении внутренним давлением проводили на пневмогидравлическом стенде. Объектом испытаний служили четыре прямых трубных образца (сталь 20) длиной $L = 800$ мм, наружным диаметром $D = 194$ мм и толщиной стенки $t = 9$ мм (рис. 5) с предварительно нанесенными на расстоянии 300 мм

Геометрические характеристики поперечных надрезов

№ трубного образца	Глубина надреза ($t - t_n$), мм	Угол надреза ψ , град
8	6,6	0...360
8a		0...360
9	5,0; 6,6	0...180; 180...360
9a		0...180; 180...360

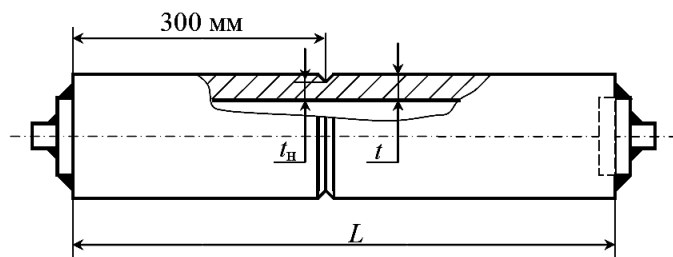


Рис. 5. Трубный образец $\varnothing 194 \times 9$ мм с поперечным поверхностным надрезом.

от торца поверхностными поперечными надрезами различных типоразмеров (табл. 3). Надрезы наносили дисковой фрезой диаметром 80 мм, толщиной 3 мм и углом заточки 45° .

На трубные образцы № 8 и 8a наносили осесимметричные (угол надреза $\psi = 360^\circ$) поперечные надрезы, имеющие постоянную глубину ($t - t_n = 6,6$ мм) – рис. 6,а, на образцы № 9 и 9a – комплексные поперечные надрезы ($\psi = 180^\circ$) глубиной 5,0 и 6,6 мм – рис. 6,б. Величина R_n на рис. 6 соответствует среднему радиусу бездефектного трубного образца. В расчетах, представленных ниже, используется средний нетто-радиус трубного образца R_h с учетом надреза ($t_n = t_{n1} = 2,4$ мм, $t_{n2} = 4,0$ мм – толщины нетто-сечения).

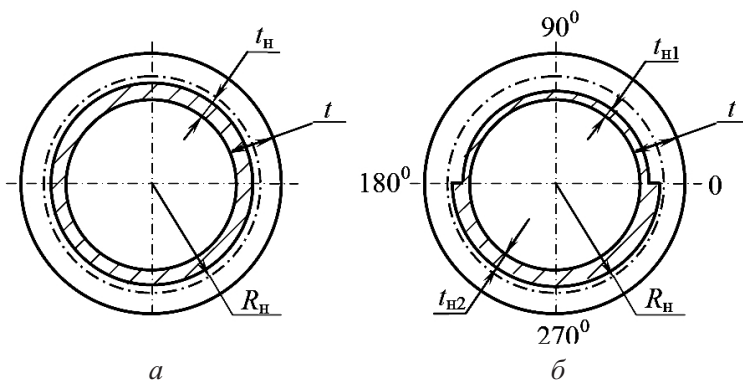


Рис. 6. Поперечное сечение трубных образцов № 8, 8a (а), № 9, 9a (б) $\varnothing 194 \times 9$ мм в зоне поперечного надреза.

Методика испытаний аналогична предыдущей.

Выбор размеров надреза. На рис. 7 в координатах толщина нетто-сечения t_n/t – угол надреза ψ показана граница между областями предполагаемых

типов разрушения: течь и разрушение [15], точка – прогнозируемый характер разрушения трубных образцов. Поскольку толщина нетто-сечения образцов № 8 и 8а ($t_H = 2,4$ мм) совпадает с толщиной нетто-сечения образцов № 9 и 9а ($t_H = 2,4$ мм), ордината этих точек одинакова. Как видно, ожидаемой потере несущей способности всех трубных образцов с поперечными надрезами соответствует разрушение. Из-за трудностей нанесения поперечных надрезов невозможно получить два вида потери несущей способности образцов. Граница между областями течи и разрушения определена с использованием глобальной и локальной моделей расчета ссылочных напряжений [15].

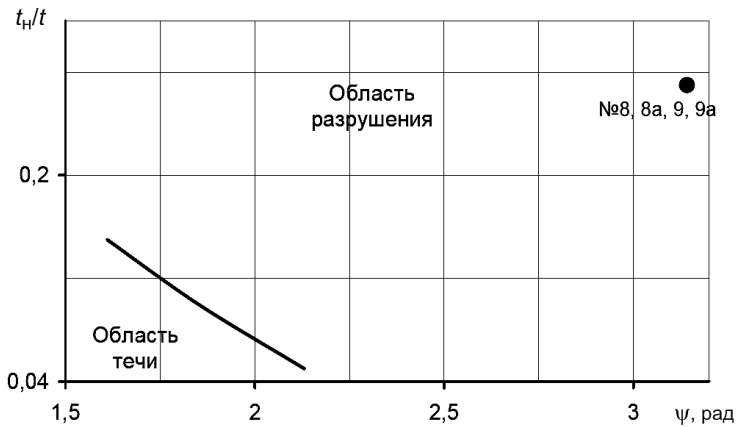


Рис. 7. Условная расчетная граница между областями течи и разрушения трубных образцов $\varnothing 194 \times 9$ мм с поперечными надрезами.

Результаты теоретических расчетов и эксперимента. Поскольку на образцы № 8 и 8а наносили осесимметричные надрезы, расчет σ_{ref} по глобальной и локальной моделям дает одинаковые результаты [15]. Глобальная модель представлена в виде формул

$$\varphi_0(2 - p) = n\pi - p\pi/2 + \psi a/t; \quad (12)$$

$$2m = (2 - p)\cos\varphi_0 - (a \sin\psi)/t, \quad (13)$$

где p – безразмерное экспериментальное внутреннее давление, $p = P_3 R_h / (\sigma_{ref} t)$; P_3 – внутреннее давление, полученное в результате испытаний; n – безразмерная осевая сила, $n = N / (2\pi R_h t \sigma_{ref})$; N – приложенная осевая сила; m – безразмерный изгибающий момент, $m = M / (4R_h^2 t \sigma_{ref})$; M – приложенный изгибающий момент; φ_0 – граница между отрицательными и положительными напряжениями в поперечном дефектном сечении трубного образца (рис. 8); $a = t - t_H$.

Поскольку трубные образцы испытывали при действии внутреннего давления p , в расчетах величины n и m принимали равными нулю.

Для трубных образцов, на которые наносили комплексные надрезы (№ 9, 9а), σ_{ref} рассчитывали с использованием как глобальной, так и локальной модели [15] соответственно:

$$\varphi_0(2 - p)(1 - a/t) = n\pi - 0,5p\pi(1 - a/t) + 2\pi a(\psi/\pi - 0,5)/t; \quad (14)$$

$$m = (1 - a/t)(1 - p/2)\cos\varphi_0. \quad (15)$$

Алгоритм нахождения σ_{ref} описан ранее [15].

Реальный предел прочности материала σ_B трубных образцов определяли по данным испытаний пятикратных цилиндрических образцов на растяжение [18], вырезанных как в продольном, так и поперечном направлении, $\sigma_B = 411...420$ МПа. В табл. 4 представлено сравнение экспериментальных данных с теоретическими. Значения расчетного внутреннего давления определены как $P_T = p\sigma_B t/R_h$, где $\sigma_B = 415,5$ МПа.

Т а б л и ц а 4

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими для трубных образцов $\varnothing 194 \times 9$ мм с поперечными надрезами

№ трубного образца	Глубина надреза $t - t_n$, мм	Угол надреза ψ , град	P_3 , МПа	σ_{ref} , МПа	P_T , МПа
8	6,6	0...360	27,1	$\frac{503,5}{503,5}$	$\frac{22,4}{22,4}$
8а			24,3	$\frac{451,5}{451,5}$	
9	5,0; 6,6	0...180; 180...360	22,3	$\frac{378,0}{414,5}$	$\frac{24,5}{22,4}$
9а			25,8	$\frac{437,3}{479,5}$	

Примечание. Над чертой приведены данные, полученные по глобальной модели, под чертой – по локальной.

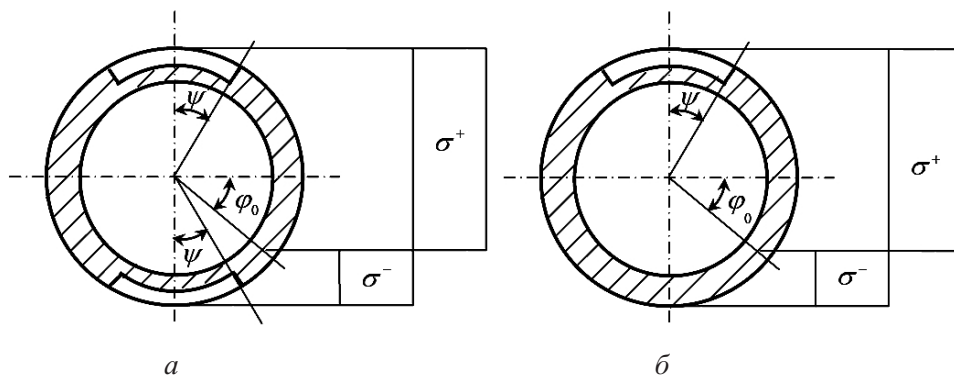


Рис. 8. Поперечное сечение трубного образца в зоне надреза: а – локальное решение; б – глобальное решение.

Отметим, что характер потери несущей способности трубных образцов (разрушение) при испытаниях аналогичен прогнозируемому – образцы разрушились пополам.

Испытания трубных образцов с поперечными надрезами при нагружении внутренним давлением и изгибающим моментом проводили на испытательной машине Р-10. Объектом испытаний служили два прямых трубных образца (сталь 22К) длиной $L = 2000$ мм, наружным диаметром $D = 160$ мм и толщиной стенки $t = 16$ мм (рис. 9) с предварительно нанесенными на расстоянии 1000 мм от торца поверхностными поперечными надрезами различных типоразмеров (рис. 10). Надрезы наносили дисковой фрезой диаметром 80 мм, толщиной 3 мм и углом заточки 45° . Отметим, что реальные глубины надрезов отличаются от представленных на рис. 10, о чем свидетельствуют результаты замеров после испытаний (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими для трубных образцов $\varnothing 160 \times 16$ мм с поперечными надрезами

№ трубного образца	Угол надреза ψ , град	Предполагаемая глубина надреза (рис. 10), мм	Реальная глубина надреза, мм	P_3 , МПа	$M_3 \cdot 10^{-3}$, Н·м	σ_{ref} , МПа, по глобальной модели
1	0...360	12	13,0	10,0	37,2	563,0
2	0...180	13	12,5	13,5	43,0	539,9
	180...360	11	10,5			

Примечание. M_3 – экспериментальное значение изгибающего момента.

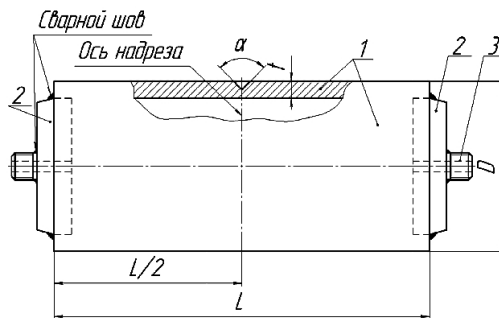


Рис. 9. Трубный образец $\varnothing 160 \times 16$ мм: 1 – труба; 2 – заглушка; 3 – штуцер.

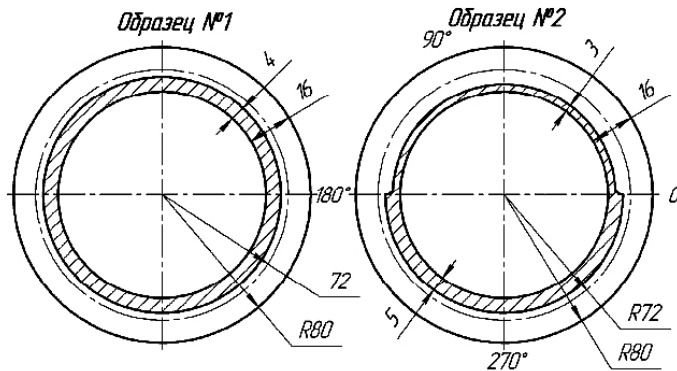


Рис. 10. Поперечное сечение трубных образцов $\varnothing 160 \times 16$ мм.

Методика испытаний. Трубные образцы одновременно нагружали внутренним давлением и изгибающим моментом. Схема нагружения образцов изгибающим моментом представлена на рис. 11, где F – сосредоточенное усилие; $M_{\text{изг}}$ – изгибающий момент; $l_1 = 800$ мм; $l_2 = 200$ мм – для образца № 1; $l_1 = 900$ мм; $l_2 = 100$ мм – для образца № 2 (табл. 5, рис. 10).

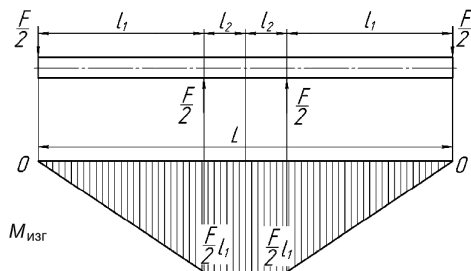


Рис. 11. Схема нагружения трубных образцов изгибающим моментом.

Выбор размеров надреза. На рис. 12 представлена условная граница [15] между областями течи и разрушения трубных образцов $\varnothing 160 \times 16$ мм, построенная с учетом одновременного действия внутреннего давления и изгибающего момента. Как и в предыдущей серии испытаний, получить течь невозможно из-за трудности нанесения надрезов – характер прогнозируемой потери несущей способности образцов соответствует области разрушения.



Рис. 12. Условная расчетная граница между областями течи и разрушения трубных образцов.

Результаты теоретических расчетов и эксперимента. Расчет σ_{ref} осуществляли с помощью глобальной модели (12), (13). Результаты сопоставления теоретических данных с экспериментальными представлены в табл. 5. Как видно, несоблюдение размеров (в данном случае глубин) наносимых поперечных надрезов повлияло на результаты испытаний. Трубный образец № 2 оказался прочнее образца № 1. Характер потери несущей способности образцов подтвердил прогноз (рис. 12) – разрушение.

Кроме того, проведены испытания на растяжение плоского образца, вырезанного из трубного образца № 1 в продольном направлении, по результатам которого получено значение предела прочности $\sigma_B = 487,3$ МПа.

Испытание трубного отвода с продольным поверхностным надрезом при нагружении внутренним давлением проводили на пневмогидравлическом стенде. *Объектом испытаний* служил трубный отвод $\varnothing 219 \times 12$ мм (сталь 08X18H10T) с надрезом глубиной 9 мм и длиной 85 мм (рис. 13).

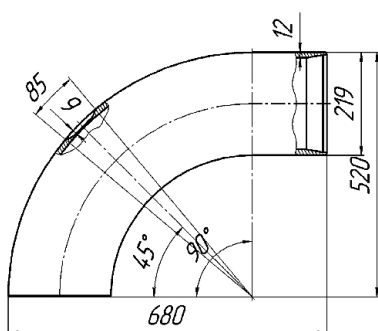


Рис. 13. Схема трубного отвода.

Методика испытаний. Трубный отвод, предварительно заполненный водой, нагружали внутренним давлением воздуха, которое создавалось компрессором КЛ-10/1000, до разрушения.

Выбор размеров надреза. Учитывая толстостенность отвода и технические возможности пневмогидравлического стенда, глубину надреза выбирали таким образом, чтобы добиться существенного снижения его остаточной прочности. Для определения точности используемой в расчетах аналитической модели [13] длину надреза выбирали в диапазоне значений, где ее влияние наиболее существенно на остаточную прочность отвода. Как видно из рис. 3, прогнозируемым видом потери несущей способности трубного отвода является течь (темный квадрат). Расположение надреза на внешней образующей отвода обусловлено тем, что именно здесь наблюдается наибольшее влияние кривизны отвода на несущую способность по сравнению с прямой трубой.

Результаты теоретических расчетов и эксперимента. Предельное давление определяли следующим образом:

$$P_T = \frac{\alpha_{II}}{Y} \frac{\sigma_B t}{R} = 39,2 \text{ МПа}, \quad (16)$$

где R – средний радиус поперечного сечения отвода; t – толщина стенки отвода; σ_B – предел прочности, определенный по результатам испытаний на растяжение цилиндрических трубных образцов, вырезанных в поперечном направлении, $\sigma_B = 626$ МПа; α_{II} – безразмерный коэффициент уменьшения прочности, $\alpha_{II} = 0,486$; Y – функция формы отвода, определяемая так [19]:

$$Y = \frac{1 + 0,5\beta \sin \theta}{1 + \beta \sin \theta} = 0,9 \quad (17)$$

($\beta = R/B = 0,252$; B – средний радиус кривизны отвода, $B = 410,5$ мм; θ – угол, на который опирается отвод, $\theta = \pi/2$).

При расчете ссылочных напряжений получено $\sigma_{ref} = 607$ МПа.

Испытания показали, что разрушение ($P_3 = 38$ МПа) произошло по классической схеме – прораствание поверхностного надреза до сквозного без увеличения его длины в продольном направлении, что дает основания отнести данный вид потери несущей способности к течи.

На точность проведения теоретических расчетов могут повлиять: реальная форма поверхностного надреза; разнотолщинность и овальность трубных образцов; различие между реальными механическими характеристиками материала.

Выводы

1. Разработана программа подготовки трубных образцов для экспериментального обоснования явления “течь перед разрушением” в лабораторных условиях Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, позволяющая получить два вида потери несущей способности (течь и разрушение) по результатам испытаний и спрогнозировать условную границу между ними.

2. Проведены натурные испытания трубных образцов с предварительно нанесенными поверхностными надрезами при нагружении внутренним давлением. Также проведены испытания трубных образцов с поверхностными поперечными надрезами при нагружении внутренним давлением и изгибающим моментом.

3. Аналитические подходы [13, 14], используемые при теоретических расчетах, дают большую точность по сравнению с эмпирическими формулами [3]. При теоретических расчетах по формулам [3], даже несмотря на использование в качестве предельной характеристики предела прочности, получены заниженные результаты. Предлагаемые [11, 12] подходы к оценке остаточной прочности элементов трубопроводов с продольными [13] и поперечными [15] поверхностными дефектами дают достаточно хорошее соответствие с экспериментальными данными.

4. Теоретически спрогнозирована и экспериментально подтверждена зависимость критической глубины поверхностной продольной трещины от длины как граница между течью и разрушением при нагружении трубы внутренним давлением. Это является обоснованием экспериментального явления “течь перед разрушением”.

Резюме

Модернізовано експериментальне устаткування та сформульовано вимоги до геометричних розмірів надрізів трубних зразків. Проведено серію випробувань до руйнування при навантаженні внутрішнім тиском і згинальним моментом прямих трубних зразків із поздовжніми та поперечними поверхневими надрізами, а також трубного відводу з поздовжнім поверхневим надрізом. Експериментальні дані зіставляються з теоретичними розрахунками. Теоретично спрогнозовано й експериментально обґрунтовано умовну границю між “течею” та “руйнуванням” при навантаженні внутрішнім тиском прямої труби з поздовжнім поверхневим дефектом.

1. 10CFR50. Appendix A: General Design Criteria for Nuclear Power Plants. – 1987.
2. USNRC Draft Standard Review Plan 3.6.3. Leak-Before-Break Evaluation Procedure. – March 1987.
3. Kiefner J. F., Maxey W. A., Eiber R. J., and Duffy A. R. Fracture stress levels of flaws in pressurized cylinders // Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing. – ASTM STP 536. – 1973. – P. 461 – 481.
4. American Petroleum Institute API RP 579, Recommended Practice for Fitness for Service. – 2000.
5. SINTAP 1999, Final Version. – November 1999.
6. Астанин В. В., Бородачев Н. М., Богдан С. Ю. и др. Прочность трубопроводов с коррозионными повреждениями // Пробл. прочности. – 2009. – № 5. – С. 73 – 85.
7. Kanninen M. F., Broek D., Hahn G. T., et al. Toward and elastic plastic fracture mechanics predictive capability for reactor piping // Nucl. Eng. Des. – 1978. – 48. – P. 117 – 134.
8. Ranta-Maunus A. K. and Achenbach J. D. Stability of circumferential through cracks in ductile pipes // Ibid. – 1980. – 60. – P. 339 – 345.
9. Schulze H. D., Toggler G., and Bodmann E. Fracture mechanics analysis on the initiation and propagation of circumferential and longitudinal cracks in straight pipes and pipe bends // Ibid. – 58. – P. 19 – 31.
10. НП 306.2.141-2008. Общие положения безопасности атомных станций.
11. РК-Д 0.41.505-10. Руководство по применению концепции “течь перед разрушением” на АЭС. – 2010.
12. МТ-Т.0.03.208-10. Методика расчетов трубопроводов АЭУ в рамках концепции “течь перед разрушением”. – 2010.
13. Орунук I. V. Leak and break models of pressurized pipe with axial defects // Proc. of the Biennial Int. Pipeline Conf. IPC 3, Part A. – 2007. – P. 41 – 56.
14. Орыняк И. В., Агеев С. М. Моделирование предельного пластического состояния толстостенных труб с осевыми поверхностными дефектами // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 4. – С. 115 – 123.
15. Орыняк И. В., Агеев С. М. Расчет ссылочных напряжений для поперечных дефектов сложной формы в трубах // Пробл. прочности. – 2011. – № 6. – С. 117 – 135.
16. ГОСТ 3845-75. Трубы металлические. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 3 с.
17. R/H/R6, 1999, Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects. – British Energy Generation Ltd. – 1999.
18. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 49 с.
19. Орыняк И. В., Радченко С. А. Классический подход к анализу влияния краевых условий на напряжения и податливость упругогогиба трубы // Пробл. прочности. – 2005. – № 4. – С. 64 – 94.

Поступила 24. 03. 2011