

О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ УКРЕПЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПАТРУБКОВЫХ ЗОН СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ НА ВИД ИХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Д-р техн. наук, проф. Л. Б. ЦВИК, асп. М. А. ХРАМЕНОК, асп. М. В. ШАПОВА

Определены предельные значения и закономерности изменения коэффициента жесткости осесимметричных патрубковых зон сосудов давления в зависимости от сочетания параметров укрепления отверстий. Полученные результаты позволяют прогнозировать расположение очагов возможного разрушения патрубковых зон (кромка отверстия, внутренняя поверхность патрубка, наружная галтель патрубка).

Maximal values and regularity of stiffness coefficient variation of axially symmetric branch pipe zones of pressure vessels depending on parameters combination of orifices strengthening are determined. Results allow to forecast the location of potential destruction of branch pipes zones (the edge of the orifices, the internal surface of the branch pipe, the external fillet of the branch pipe).

Разрушение материала патрубковых зон сосудов давления определяется уровнем напряжений и видом напряженного состояния (НС) в очаге разрушения. Первый из этих факторов характеризуется коэффициентом концентрации эквивалентных напряжений K_σ , величина которого для некоторых типов патрубковых зон изучена в настоящее время достаточно полно [1]. Второй фактор характеризуется коэффициентом жесткости Π напряженного состояния [2, 3], вычисляемым по формуле

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения, возникающие в точках деформируемого материала; σ_i — эквивалентное напряжение, определяемое формулой

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}. \quad (2)$$

Экспериментальные исследования показывают, что при прочих равных условиях локализации очага разрушения патрубковой зоны определяется значением коэффициента жесткости ее основных участков: наружной галтели, внутренней поверхности патрубка (на уровне наружной галтели) и внутренней кромки отверстия патрубка [4].

Влияние вида НС на расположение очага разрушения рассматриваемой патрубковой зоны в случае близких значений K_σ становится определяющим. Косвенно влияние указанного фактора и в случаях патрубковых зон цилиндрической части сосудов давления подтверждается особенностями развития трещин штуцерных узлов барабанов паровых котлов [5]. В частности, были обследованы барабаны котлоагрегатов типа Е-420-14, представляющие собой стальной цилиндр, состоящий из нескольких вальцованных или штампованных обечаек и двух штампованных сферических или эллиптических днищ. Внутренний диаметр барабанов 1800 мм, толщина стенки — 95 мм, а общая длина барабана составляет 18 метров. Барабаны изготовлены из низколегированных сталей 16 ГНМ и 16ГНМА. Обечайки между собой и с днищами соединяются многослойной автоматической электродуговой сваркой под флюсом или электрошлаковой сваркой. Расчетные параметры работы барабанов к/а Е — 420 — 14, эксплуатирующихся на ТЭЦ-9 ОАО «Иркутскэнерго»:

давление — 14 МПа, температура — 343 °С. Исследование повреждений барабанов показало, что возникновение трещин патрубковых зон в процессе эксплуатации до 240 тысяч часов происходило неоднократно в одних и тех же местах. Подавляющее большинство очагов разрушения патрубковых зон (рис. 1; трещины, ориентированные вдоль оси патрубка) наблюдалось на внутренней поверхности штуцеров (на уровне наружной галтели) и отверстий водоопускных и водоперепускных труб ($\varnothing 108 \times 10$ мм и $\varnothing 159 \times 12$ мм) [5]. Расчетные оценки показали, что коэффициент жесткости $\Pi = 1,2550$ на внутренней поверхности патрубка (на уровне наружной галтели) больше, чем на внутренней кромке отверстия, где $\Pi = 1,1715$, а для коэффициента концентрации эквивалентных напряжений K_σ наоборот: $K_\sigma = 2,59$ на внутренней кромке отверстия, что незначительно больше, чем на внутренней поверхности патрубка, где $K_\sigma = 2,27$. Данные о НС патрубковых зон барабанов соответствуют расчетным данным ГНЦ НПО «ЦНИИТМАШ» [6]. Существенно, что в используемых в настоящее время методиках расчета на прочность патрубковых зон влияние такого фактора, как схема напряженного состояния в очагах развития трещин, и значения соответствующих коэффициентов жесткости не учитываются.

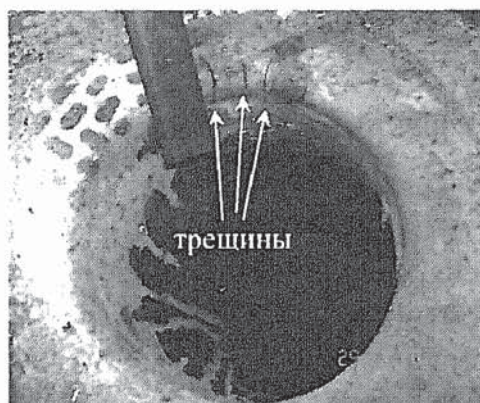


Рис. 1. Трещины на поверхности трубных отверстий и прилегающих к ним участках внутренней поверхности барабана

Нами рассмотрена осесимметричная конструкция узла патрубковой зоны, соответствующая рис. 2. Эта конструкция определяется следующими безразмерными параметрами [1]: $\alpha_1 = S_k / D_k$ — параметр толстостенности корпуса; $\alpha_2 = S_n / S_k$ — параметр толстостенности патрубка; $\alpha_3 = d_n / D_k$ — относительный внутренний диаметр патрубка; $\alpha_4 = R_n / S_n$ — относительная величина радиуса галтельного перехода от наружной поверхности патрубка к наружной поверхности днища.

Параметры α_1 и α_3 далее рассматриваются как основные. Их значения определяются, в основном, особенностями технологического процесса, реализуемого в сосуде, и могут варьироваться в относительно небольших пределах. Параметры α_2 и α_4 полностью определяются прочностным расчетом патрубковой зоны и далее называются параметрами укрепления.

Основные закономерности изменения вида НС осесимметричных патрубковых зон эллиптических днищ в зависимости от изменения конструктивных параметров α_1 и α_3 рассмотрены в [1]. Нами эти закономерности изучены в зависимости от изменения параметров укрепления α_2 и α_4 на основе результатов численного моделирования их деформирования. Моделирование выполнено с помощью программного комплекса «МАКРАМЕ» [7, 8], реализующего метод конечных элементов (МКЭ). При моделировании рассматривались эллиптические днища с отношением параметров $H / D_k = 0,25$, схематически представленные на

рис. 2. Материал патрубковой зоны рассматриваемых сосудов давления — конструкционная сталь, характеризуемая значениями модуля Юнга $E = 200$ ГПа и коэффициента Пуассона $\nu = 0,3$.

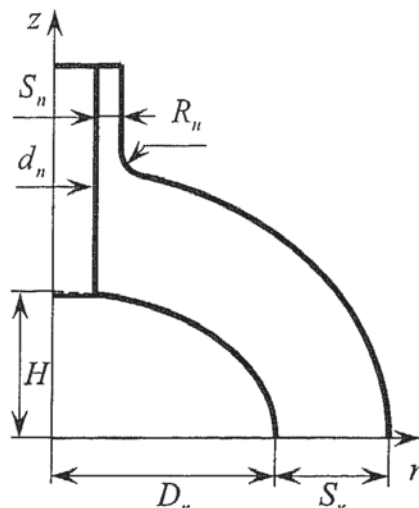


Рис. 2. Схема осевого сечения осесимметричной патрубковой зоны эллиптического днища сосуда давления с угловой внутренней кромкой отверстия

В процессе исследования НС патрубковых зон было рассмотрено 4500 конструктивных вариантов, в которых рассмотренные значения параметров укрепления отверстий и основных конструктивных параметров сочетались каждый с каждым [1]. Варианты патрубковых зон с величиной коэффициента концентрации эквивалентных напряжений $K_\sigma \geq 4$ не рассматривались, как конструктивно нерациональные. Были выбраны три основных участка поверхности патрубковой зоны: на наружной галтели, внутренней поверхности патрубка на уровне наружной галтели и в зоне кромки отверстия патрубка на внутренней поверхности сосуда. Для каждой из трех перечисленных характерных зон были определены пары конструктивных вариантов. В первом варианте каждой пары коэффициент жесткости Π достигал минимума, во втором — максимума. Полученные при этом максимальные Π^{\max} и минимальные Π^{\min} значения коэффициента жесткости среди всех рассмотренных вариантов для каждого из характерных участков патрубковых зон и соответствующие значения K_σ (в скобках) приведены в табл. 1—3, где приняты следующие обозначения жесткости напряженного состояния: Π_r — в зоне наружной галтели; $\Pi_{\text{вн}}$ — в зоне внутренней поверхности патрубка; $\Pi_{\text{кр}}$ — в зоне внутренней кромки отверстия патрубка.

Из таблиц видно, что для конструктивных вариантов с максимальными значениями коэффициента жесткости Π , уровень напряжений K_σ изменяется от 2,0 до 3,8.

Анализ результатов численного моделирования осесимметричных патрубковых зон показывает, что наиболее жесткая схема НС наблюдается на наружной галтели патрубка сосудов давления (табл. 1). Во всем исследованном диапазоне значений параметров укрепления отверстий α_2 и α_4 максимальным значениям Π на наружной галтели патрубка соответствует наименьший относительный внутренний диаметр патрубка ($\alpha_3 = 0,1$), величина которого используется при расчетах толщины стенки сосуда и штуцера для всех вариантов укрепления отверстий в соответствии с действующими нормами [9]. Внутренняя поверхность патрубка находится, как правило, в наиболее мягком для патрубковой зоны НС (табл. 2). Внутренняя кромка отверстия по своей схеме НС занимает

промежуточное положение между наружной галтелью и внутренней поверхностью патрубка (табл. 3).

Таблица 1

Наибольшие и наименьшие значения коэффициента жесткости Π наружной галтели патрубка и соответствующие значения коэффициентов K_σ

Наружная галтель патрубка		$\Pi_{\text{вн}}(K_\sigma)$	$\Pi_{\text{кр}}(K_\sigma)$	Конструктивные параметры			
				α_1	α_2	α_3	α_4
$\Pi_{\text{г}}^{\text{мин}}(K_\sigma)$	1,7162 (2,463)	0,5616 (1,298)	0,0834 (0,656)	0,1	1,5	0,1	0,15
$\Pi_{\text{г}}^{\text{макс}}(K_\sigma)$	2,0277 (2,401)	0,0973 (2,443)	0,9731 (2,075)	0,01	0,5		0,6

Таблица 2

Наибольшие и наименьшие значения коэффициента жесткости Π внутренней поверхности патрубка и соответствующие значения коэффициентов K_σ

Внутренняя поверхность патрубка		$\Pi_{\text{г}}(K_\sigma)$	$\Pi_{\text{кр}}(K_\sigma)$	Конструктивные параметры			
				α_1	α_2	α_3	α_4
$\Pi_{\text{вн}}^{\text{мин}}(K_\sigma)$	—0,3069 (3,838)	2,0125 (3,700)	0,9978 (2,376)	0,003	0,5	0,1	1,0
$\Pi_{\text{вн}}^{\text{макс}}(K_\sigma)$	0,9975 (2,264)	2,0120 (2,448)	0,9989 (2,312)		0,85		

Таблица 3

Наибольшие и наименьшие значения коэффициента жесткости Π внутренней кромке отверстия и соответствующие значения коэффициентов K_σ

Внутренняя кромка отверстия		$\Pi_{\text{г}}(K_\sigma)$	$\Pi_{\text{кр}}(K_\sigma)$	Конструктивные параметры			
				α_1	α_2	α_3	α_4
$\Pi_{\text{кр}}^{\text{мин}}(K_\sigma)$	0,1232 (0,687)	2,0017 (2,574)	0,2938 (2,758)	0,1	0,2	0,1	0,6
$\Pi_{\text{кр}}^{\text{макс}}(K_\sigma)$	1,0046 (2,639)	2,0022 (3,812)	0,4206 (2,715)	0,005	1,2	0,3	1,0

Характеристики наиболее жестких схем НС патрубковых зон сосудов давления в зависимости от параметра толстостенности патрубка α_2 приведены на рис. 3 для крайних значений рассмотренного диапазона величин параметра $\alpha_4 = 0,015$ (пунктирные линии) и 0,1 (сплошные линии) и минимального значения 0,1 относительного внутреннего диаметра патрубка (параметр α_3).

Представленные на этом рисунке графики соответствуют внутренней поверхности патрубка на уровне, соответствующем галтели наружной поверхности (линии 1÷6), кромке отверстия (линии 7÷12) и поверхности галтели (линии 13÷18). При этом для внутренней поверхности кривые 1÷3 соответствуют значению $\alpha_4 = 0,15$ и значениям $\alpha_1 = 0,003; 0,005; 0,010$ соответственно, а кривые 4÷6 — значению $\alpha_4 = 1,0$ и также значениям $\alpha_1 = 0,003; 0,005; 0,010$ соответственно. Для внутренней кромки отверстия линии 7÷9 соответствуют значению $\alpha_4 = 0,15$ и значениям $\alpha_1 = 0,003; 0,005; 0,010$ соответственно, а кривые 10÷12 — значению $\alpha_4 = 1,0$ и также значениям $\alpha_1 = 0,003; 0,005; 0,010$ соответственно. Для наружной галтели кривые 13÷15 соответствуют значению $\alpha_4 = 0,15$ и значениям $\alpha_1 = 0,003; 0,005; 0,010$ соответственно, а кривые 16÷18 — значению $\alpha_4 = 1,0$ и также значениям $\alpha_1 = 0,003; 0,005; 0,010$ соответственно.

Как видно из представленных на рис. 3 зависимостей, увеличение толстостенности патрубка (параметра α_2), для рассмотренных вариантов практически не оказывает влияния на величину коэффициента Π для поверхности наружной галтели патрубка и внутренней кромки отверстия. Коэффициент жесткости внутренней поверхности патрубка незначителен по сравнению с аналогичными коэффициентами других зон. Его величина повышается в интервале значений $[0,2 + 1,0]$ толстостенности патрубка (параметр α_2), достигая максимальных значений в интервале $\alpha_2 = 1,0 + 1,5$, и далее не увеличивается. В этом случае величина Π внутренней поверхности патрубка и величина Π внутренней кромки отверстия уравниваются при различных значениях α_4 . Отмеченные особенности позволяют сделать вывод, что в исследованном диапазоне конструктивных параметров снижение величины K_σ за счет увеличения толстостенности патрубка практически не изменяет максимальной жесткости НС и, следовательно, конструктивно рационально.

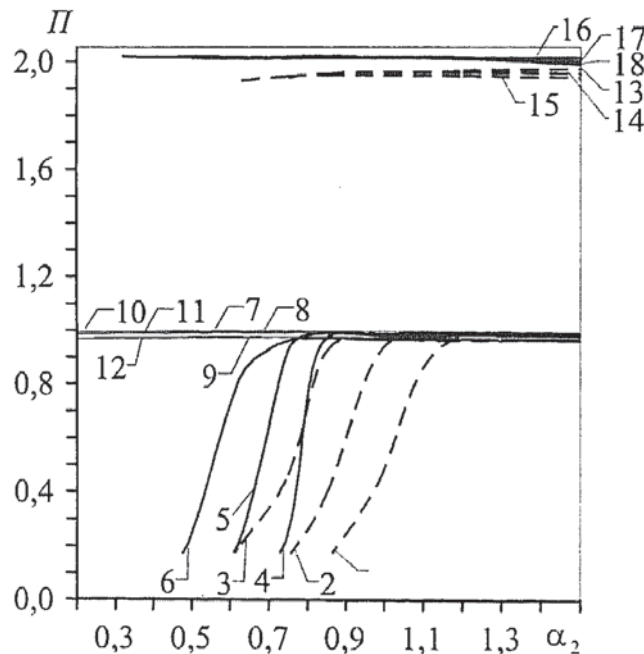


Рис. 3. Зависимость коэффициента жесткости Π от конструктивных параметров патрубковых зон при $\alpha_1 = 0,1$

Наибольшие значения Π , рассмотренных патрубковых зон, возникают при максимальном значении относительной величины радиуса галтельного перехода от наружной поверхности патрубка к наружной поверхности днища (параметр $\alpha_4 = 1,0$). При этом в

интервале значений $[0,003 \div 0,010]$ толстостенности корпуса (параметр α_1) величина коэффициента жесткости практически не изменяется (рис. 3) и незначительно снижается при значениях α_1 выше 0,020.

Примеры распределения значений коэффициента жесткости патрубковых зон в зависимости от относительной величины радиуса галтельного перехода от наружной поверхности патрубка к наружной поверхности днища (параметр α_4) для фиксированного значения относительного внутреннего диаметра патрубка ($\alpha_3 = 0,1$), показаны на рис. 4. На этом рисунке пунктирные линии 1÷3 соответствуют значению $\alpha_2 = 0,02$ и значениям $\alpha_2 = 0,2; 0,63; 1,0$ соответственно, а сплошные линии 4÷6 — значению $\alpha_2 = 0,1$ и также значениям $\alpha_2 = 0,2; 0,63; 1,0$ соответственно.

С точки зрения оценки влияния относительной величины радиуса галтели α_4 на прочность патрубковой зоны увеличение этого параметра может оказаться конструктивно нерациональным. Связано это с тем, что вызывает повышение коэффициента жесткости наружной галтели патрубка (рис. 4, а) и при увеличении этого радиуса, как правило, коэффициенты жесткости НС внутренней поверхности патрубка и внутренней кромки отверстия несколько увеличиваются (рис. 4, б, в). Разработка соответствующих конструктивных рекомендаций требует дополнительных исследований.

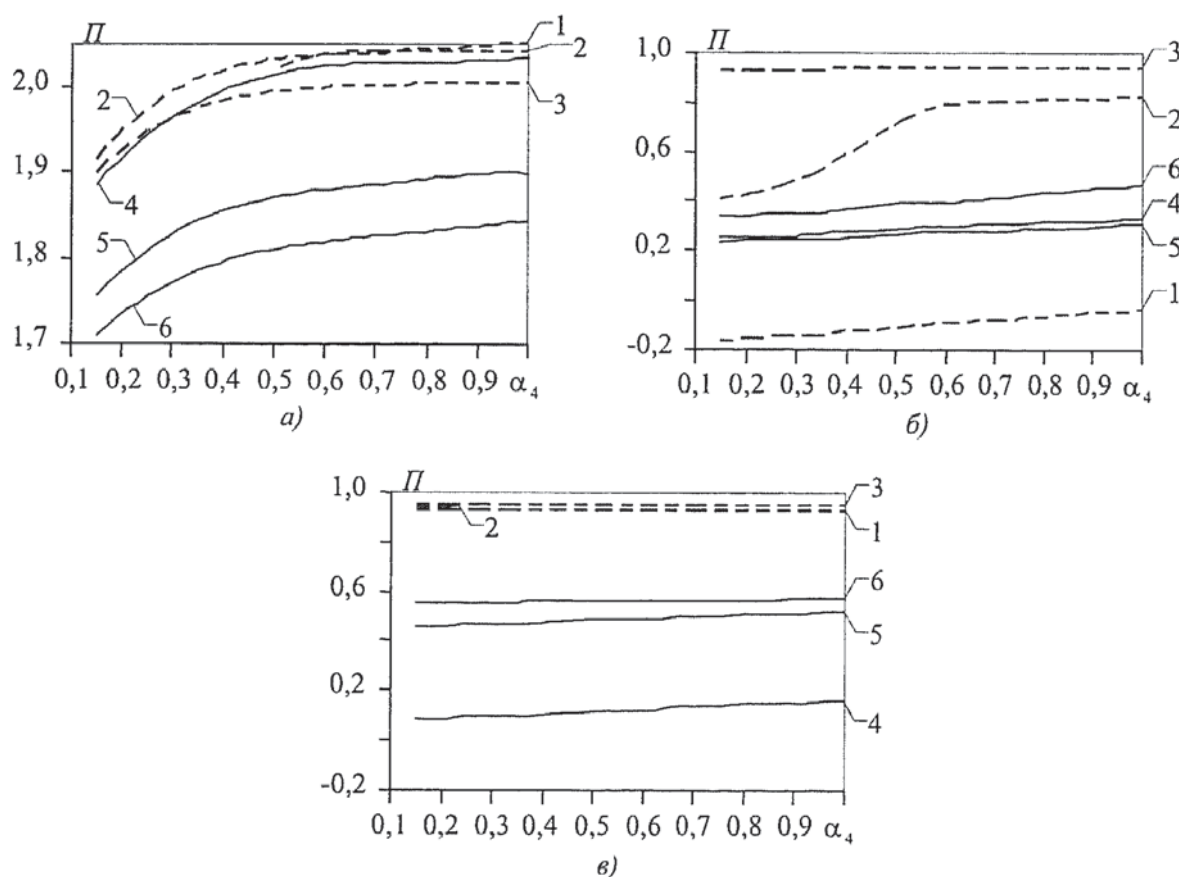


Рис. 4. Зависимость коэффициента жесткости Π патрубковых зон от их конструктивных параметров при $\alpha_3 = 0,1$: а – наружная галтель патрубка; б – внутренняя поверхность патрубка; в – внутренняя кромка отверстия

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Увеличение параметров укрепления отверстий оказывает различное влияние на НС патрубковых зон сосудов давления: увеличение толстостенности патрубка S_{II} / S_K прак-

тически не вызывает повышения максимального коэффициента жесткости патрубковой зоны. Увеличение относительной величины радиуса галтельного перехода R_{II} / S_{II} от 0,15 до 1,0 вызывает при этом существенное повышение максимального значения коэффициента жесткости (на наружной галтели) при незначительном его увеличении величины Π на внутренней поверхности патрубка.

2. Внутренняя кромка отверстия для рассмотренных случаев занимает по своей схеме НС промежуточное положение между наружной галтелью и внутренней поверхностью патрубка. Жесткость ее НС слабо зависит от относительной величины радиуса галтельного перехода R_{II} / S_{II} .

3. Наиболее жесткое НС в случае относительно толстостенных патрубков при деформировании патрубковых зон сосудов давления возникает на наружной галтели патрубка, при этом максимальным значениям коэффициента Π соответствуют максимальные значения относительной величины радиуса галтельного перехода $R_{II} / S_{II} = 1,0$ и минимальные значения толстостенности патрубка $S_{II} / S_K = 0,2$.

4. Во всем исследованном диапазоне значений параметров укрепления отверстий S_{II} / S_K и R_{II} / S_{II} наиболее жестким схемам НС наружной галтели и внутренней поверхности патрубка соответствует минимальное значение относительного внутреннего диаметра патрубка $d_{II} / d_K = 0,1$.

5. Наиболее мягкие НС наружной галтели патрубка и внутренней кромки отверстия создаются при максимальном значении толстостенности корпуса сосуда $S_K / d_K = 0,1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цвик Л. Б., Храменок М. А., Шапова М. В. О влиянии основных конструктивных параметров осесимметричных патрубковых зон сосудов давления на вид их напряженного состояния // Вестник ИрГТУ. — 2006. — № 4 (28). — Т. 1. — С. 30—34.
2. Смирнов - Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы расчета. — Л.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
3. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник — М.: «Машиностроение», 1985. — 224 с.
4. Цвик Л. Б., Пимштейн П. Г., Борсук Е. Г. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния многослойного цилиндра с монолитным вводом // Проблемы прочности. — 1978. — № 4. — С. 4.
5. Буйнов Н. Е., Храменок М. А. Оценка продления эксплуатации барабанов котлов. Всероссийская VIII научно-техническая конференция «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». — 30.06.2001 г. — Иркутск: ИрГТУ, 2001.
6. Заключение экспертизы промышленной безопасности на барабан котлоагрегата ТП-85 ст. № 2, установленного на ТЭЦ-9 ОАО «Иркутскэнерго», рег. № 37-ТУ-00930-2003, выданное ГНЦ НПО «ЦНИИТМАШ».
7. Деформирование плавных переходов, соединяющих патрубков и корпус сосуда высокого давления / Л. Б. Цвик, Г. Г. Зорина, М. В. Шапова и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2004. — Вып. 2. — С. 111—117.
8. Цвик Л. Б., Зеленая О. Г., Шапова М. В. и др. Осесимметричное деформирование и прочность патрубковых зон плоских крышек сосудов давления // Известия вузов. Машиностроение. — 2004. — 7. — С. 71—79.
9. ГОСТ 24755-89 (СТ СЭВ 1639-88) «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий». — М.: Государственный комитет СССР по стандартам.