



УДК 621.791.052:539.4

ОЦЕНКА ОГРАНИЧЕННОГО ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

ASSESSMENT OF THE LIMITED ENDURANCE LIMIT FOR WELDED STEEL STRUCTURES OF VERTICAL TANKS

Халимуллин Артур Анфисович

магистрант,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
khalimullin.artur@bk.ru

Научный руководитель –

Ерофеев Валерий Владимирович

профессор кафедры «Оборудование и
технологии сварки и контроля»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет

Аннотация. Статья посвящена одной из важнейших задач, стоящих перед топливно-энергетическим комплексом РФ – повышению надежности и долговечности металлоконструкций резервуарного парка (в частности, вертикальных стальных резервуаров) в условиях их малоциклового нагружения по схеме «слив-налив».

Ключевые слова: сварные металлоконструкции, вертикальные резервуары, предел выносливости, повышение надежности, долговечность.

Halimullin Artur Anfisovich

Graduate student,
Ufa State Oil Technical University
khalimullin.artur@bk.ru

Scientific Director –

Erofeev Valery Vladimirovich

Professor of the Department «Equipment
and Welding and inspection technology»,
Ufa State Oil Technical University

Annotation. The article is devoted to one of the most important tasks facing the fuel and energy complex of the Russian Federation – to increase reliability and durability of metal structures of tank farm (in particular, vertical steel tanks) in conditions of their low-cycle loading according to «plum-flush» scheme.

Keywords: welded steel structures, vertical steel tanks, endurance limit, reliability increase, durability.

Одной из важнейших задач, стоящих перед топливно-энергетическим комплексом РФ, является повышение надежности и долговечности металлоконструкций резервуарного парка (в частности, вертикальных стальных резервуаров) в условиях их малоциклового нагружения по схеме «слив-налив».

Анализ исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными [1–3 и др.], в области изучения поведения материалов при циклических напряжениях, вызывающих усталостное разрушение после небольшого числа циклов нагружения, показал, что в данной области нагружения наблюдается ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать при рассмотрении полной кривой усталости материалов. В частности, было установлено [3], что область ограниченной усталости (ломанная прямая АБВГ, рис. 1) охватывает диапазон напряжений от σ_b (предела прочности материала) до σ_r (предела выносливости материала при произвольном цикле нагружения r , которая делится на подобласти малоциклового усталости (наклонные прямые I и II) и многоциклового усталости (наклонная прямая III). Переход области малоциклового усталости в многоцикловую осуществляется на уровне напряжений, отвечающих значению σ_k (динамическому пределу текучести материала при скоростях, соответствующих циклическому нагружению, который при обычных условиях нагружения равен пределу текучести материала: $\sigma_k = \sigma_T$).

Как было показано в работе [4] для широкого класса конструкционных сталей в первом приближении можно принять $N_G = 2 \cdot 10^6$ и $N_b = 10$, а единую кривую усталости при пульсирующем цикле нагружения ($r = 0$) можно представить в следующем виде, показанном на рисунке 2.

Для построения данной схематизированной кривой усталости для конструкционных материалов необходима информация о пределе выносливости материала резервуара σ_0 , угле наклона прямой АГ, а также значениях границ диапазона циклов N_G и N_b .

Величина σ_0 , как правило, определяется на основании длительных испытаний образцов (при нагружении порядка $10^6 \dots 10^7$ циклов), либо пересчетом по известным значениям σ_{-1} , полученным экспериментально при испытаниях на усталость при симметричном характере нагружения ($r = \sigma_{-1}$).



Данный пересчет возможен при использовании аппроксимирующих соотношений, полученных на основании статистической обработки экспериментальных данных по σ_{-1} , приведенных в работах [5, 6 и др.] для различных марок конструкционных сталей. Наиболее приемлемой для расчетной оценки σ_{-1} , на наш взгляд, является зависимость (1), приведенная в работе [7].

$$\sigma_{-1} = 0,285 (1 + \gamma) \sigma_B, \tag{1}$$

где $\gamma = \sigma_T / \sigma_B$ – показатель деформационного упрочнения материала.

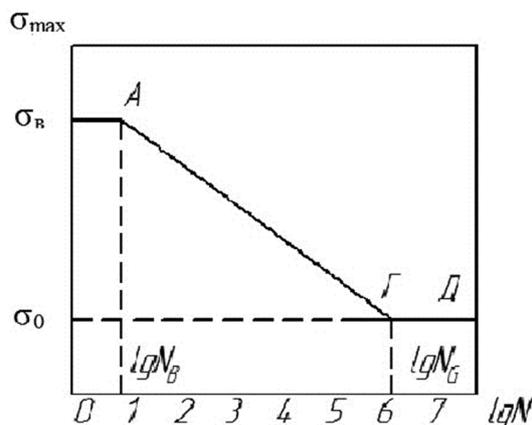


Рисунок 1 – Единая схематизированная кривая усталости конструкционных материалов

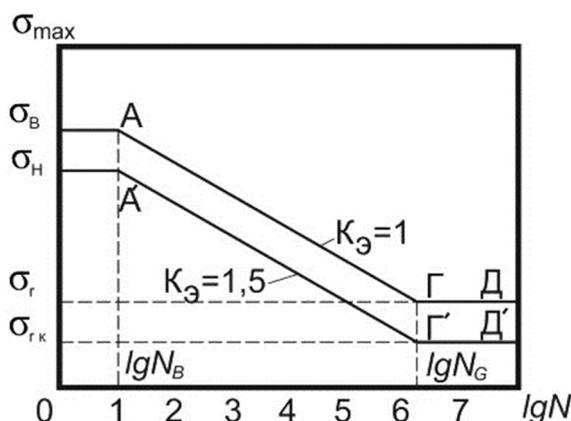


Рисунок 2 – Единая кривая усталости сварных резервуаров с учетом наличия эффекта концентрации напряжений $K_э$

Для расчетного определения σ_0 , характеризующей работу металлоконструкций по схеме «слив-налив», можно воспользоваться взаимосвязью между известными значениями σ_0 и σ_{-1} . Ограничимся рассмотрением одного из данных подходов, основанным на использовании диаграммы А. Смыта, который подробно изложен в работе [8].

В соответствие с рассматриваемым подходом установлена взаимосвязь между пределами выносливости σ_{-1} и σ_0 в виде следующего соотношения:

$$\sigma_0 = 2 \sigma_{-1} [1 / (1 + \sigma_{-1} / \sigma_B)]. \tag{2}$$

С учетом соотношения (1), было получено окончательное выражение для определения предела выносливости материала при пульсирующем цикле нагружения σ_0 :

$$\sigma_0 = \sigma_B [0,57(1 + \gamma) / (1 + 0,285 (1 + \gamma))]. \tag{3}$$

Для учета фактора концентрации напряжений при оценке предела выносливости сварных соединений резервуаров необходима информация о величине коэффициента концентрации K_{σ} .

Данный эффект учитывается введением параметра $K_{\sigma T}$, который согласно анализу работ [7, 8, 12] может быть описан, например соотношением, полученным В.В. Кархиным:

$$K_{\sigma T} = 1 + [\rho (14 / B + 1,7 / C + 5 / t)] - 0,5, \tag{4}$$

где ρ, B, C и t – геометрические параметры стыковых швов.



При нарушении технологии изготовления сварных сосудов и аппаратуры и недостаточного контроля качества данных изделий в последних могут наблюдаться либо нарушения геометрической формы изделий (смещение кромок, угловатость и т.п., либо трещиноподобные дефекты (типа непроваров, несплавлений, подрезов и т.п.), что существенным образом сказывается на уровне работоспособности резервуаров, работающих как при статическом, так и при циклическом нагружении [9, 10, 14].

В окрестности таких дефектов (точках А) также возникает концентрация напряжений, величина которой может быть оценена параметром $K_{\sigma d}$. В существующей справочной и научной литературе приведены расчетные зависимости для оценки коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях, ослабленных данного рода дефектами. В частности, в работе [7] приведена подборка данных зависимостей для определения коэффициента концентрации напряжений $K_{\sigma d}$ в стыковых сварных соединениях при наличии технологических дефектов сварки:

При наличии поверхностных дефектов типа подреза:

$$K_{\sigma d} = 1 + 0,58 (l / \rho) 0,5, \quad (5)$$

При наличии поверхностных дефектов типа подреза и неоднородности геометрической формы стыкового шва:

$$K_{\sigma} = K_{\sigma d} K_{\sigma r}. \quad (6)$$

При наличии смещения кромок Δ и угловатости:

$$K_{\sigma} = K_{\sigma r} (1 + k_1 + k_2), \quad (7)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, учитывающие соответственно влияние величины смещения кромок Δ и угловатости β . Значения этих коэффициентов определяются по формулам:

$$k_1 = 3 (\Delta / t), \quad (8)$$

$$k_2 = 6 (B / t) \operatorname{tg} \beta, \quad (9)$$

Для оценки коэффициента концентрации напряжений $K_{\sigma A}$ в наиболее нагруженных точках сварных соединений (точках А), выполненных с угловыми швами, можно воспользоваться соотношением Г.П. Турмана [7, 13]:

$$K_{\sigma A} = 1 + 0,2 [(2t - k / \rho_A)] 0,5, \quad (10)$$

где k – катет углового шва; ρ_A – радиус в месте перехода от шва к угловому шву.

В тех случаях, когда резервуары изготавливаются из листов определенных размеров толщин стенки корпуса t , при которых в условиях ручной дуговой сварки на монтаже не обеспечивается полное проплавление вертикальной стенки в области уторных узлов [12], и наблюдается непровар стенки с радиусом ρ_c (в точке С) в вершине непровара), коэффициент концентрации напряжений $K_{\sigma c}$ в вершине непровара может быть определен по соотношению, полученному в работе [13].

Предел выносливости сварных корпусных металлоконструкций $\sigma_{ок}$ можно определить с учетом значений предела выносливости материала резервуаров или их сварных соединений σ_0 по известной информации о коэффициентах эффективности концентрации напряжений K_3 , под которыми понимается отношение:

$$K_3 = \sigma_{ок} / \sigma_0 \quad (11)$$

Данный эффективный коэффициент концентрации напряжений K_3 , может быть подсчитан по методике, изложенной в работах [4, 7, 8]:

$$K_3 = 1 + q_{\sigma} (K_{\sigma} - 1), \quad (12)$$

где $0 < q_{\sigma} < 1$ – коэффициент чувствительности материала к концентрации [8]); K_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

На основе обработки экспериментальных данных, приведенных в работе [14], была установлена зависимость $q_{\sigma} = q (K_{\sigma}, \sigma_B)$, с учетом которой выражение (12) можно представить следующим, аппроксимированным соотношением:

$$K_3 = 1 + \frac{(K_{\sigma} - 1)}{1 + \left(\frac{\sigma_{BH}}{\sigma_B} \right)^2 (K_{\sigma} - 1)}, \quad (13)$$

где $\sigma_{BH} = 400$ МПа – нормированная величина условного предела прочности.

Таким образом, по полученному значению параметра K_3 можно расчетным путем определить величину предела выносливости сварных соединений корпуса резервуара с учетом фактора концентрации напряжений:



$$\sigma_{ок} = \sigma_0 / K_{\sigma} \text{ (при } K_{\sigma} > 1\text{)}. \tag{14}$$

Исходя из анализа технического состояния корпуса резервуара (наличия дефектов, угловатости, смещения кромок (l, ρ, Δ, β), основных геометрических параметров стыковых (ρ, B, C, t), нахлесточных и тавровых соединений (k, ρ_A) устанавливается зона с повышенной концентрацией напряжений $K_{\sigma_{max}}$, которая определяет долговечность сварных цилиндрических вертикальных резервуаров.

Используя соотношение (13) по заданным механическим характеристикам материала или сварного соединения σ_B и величине $K_{\sigma_{max}}$ можно расчетным путем можно определить величину $K_{\sigma_{max}}$, определяющую предел выносливости резервуара $\sigma_{ок} = \sigma_0 / K_{\sigma_{max}}$ при $N > N_G$.

Для оценки ограниченного предела выносливости конструкционных материалов можно воспользоваться упрощенной единой диаграммой усталости материалов, приведенной на рисунке 1. Данная диаграмма при некотором уточнении граничных условий может быть использована в рамках инженерного подхода для оценки ограниченного предела выносливости материалов при наличии концентраторов напряжений.

Основные трудности построения единых диаграмм усталости в данном случае связаны с определением точки А, так как положение точки Г диаграммы определяется координатами $\sigma_{ок} = \sigma_0 / K_{\sigma}$ и $N_G = 2106$. При малом числе циклов нагружения $N < N_B$, отвечающем циклической ползучести и квазистатическому разрушению с образованием шейки на участке излома, при отсутствии концентраторов напряжений ($K_{\sigma} = K_{\sigma} = 1$) в данной области деформирования уровень номинальных напряжений $\sigma_H = \sigma_B$.

Наличие концентрации напряжений вносит специфические особенности в характер деформирования металла в зонах, расположенных вблизи концентратора [15]. Во-первых, вблизи концентратора образуются пластические области, в которых происходит снижение уровня напряжений по сравнению с упругими распределениями, получаемыми из решения теоретических задач теории упругости. Во-вторых, в данных областях наблюдается объемное напряженно-деформированное состояние, характеризующееся параметрами: Π_{max} и Q (показателем жесткости напряженного состояния и коэффициентом стеснения пластических деформаций [16]:

$$\Pi_{max} = (\sigma_{maxy} + \sigma_{maxx} + \sigma_{maxz}) / 3T_i = 2Q - 1, \tag{15}$$

где $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$ – главные напряжения в зоне концентрации; T_i – интенсивность касательных напряжений.

Так, например, для сварных тавровых соединений резервуаров, выполненных с полным проплавлением стенки, данная пластическая зона возникает в районе перехода от шва к основному металлу для соединений, выполненных с неполным проплавлением стенки, – в окрестности вершины неповара (С), В данных зонах реализуется плоское напряженное состояние ($\sigma_y > 0; \sigma_z = 0,5\sigma_y; \sigma_x = 0$) в условиях плоской деформации [14] и уравнения для определения максимальных напряжений имеют следующий вид:

$$\sigma_{maxy} = a_{\sigma} \times \sigma_H, \tag{16}$$

$$\sigma_{maxz} = 0,5a_{\sigma} \times \sigma_H,$$

$$\sigma_{maxx} = 0,$$

где a_{σ} – коэффициент концентрации напряжений в пластической области деформирования вблизи вершины концентратора.

С учетом представленных соотношений (16) при значениях интенсивности касательных напряжений $T_i = 0,5 \cdot \sigma_H$ имеем:

$$\Pi = a_{\sigma};$$

$$Q = 0,5 (a_{\sigma} + 1). \tag{17}$$

Как было показано в работе [16 и др.], максимальные напряжения в пластической зоне σ_{maxy} при известных значениях коэффициента стеснения пластических деформаций Q определяются по формуле:

$$\sigma_{maxy} = Q \cdot \sigma_B, \tag{18}$$

откуда:

$$\sigma_{maxy} = 0,5 (a_{\sigma} + 1) \sigma_B. \tag{19}$$

Исходя из соотношений (16) и (19) можно определить среднее номинальное напряжение σ_H , при котором наблюдается предельно равновесное состояние вблизи концентратора напряжений, сопровождающееся процессом разрушения, имеющим квазистатический характер, с образованием шейки в месте излома:



$$\sigma_n = 0,5\sigma_b [(a_\sigma + 1) / a_\sigma]. \quad (20)$$

Нетрудно заметить, что данное соотношение при отсутствии концентрации напряжений (т.е. при $a_\sigma = 1$) дает $\sigma_n = \sigma_b$ (рис. 1).

Важным этапом в процессе корректировки единой диаграммы усталости материалов, учитывающей фактор концентрации напряжений при уточнении координат точки А, является расчетное определение коэффициента концентрации напряжений упругопластической зоне a_σ .

В работе [17] на основании подхода А. Нейбера [18] была установлена связь между теоретическим коэффициентом концентрации напряжений, полученным на основании упругого решения о напряженном состоянии в окрестности вершины концентратора K_σ и коэффициентом концентрации напряжений a_σ , описывающим эффект концентрации напряжений в пластической зоне:

$$a_\sigma = K_\sigma^{[2m / (1+m)]} [\sigma_n / \sigma_T]^{(m-1) / (1+m)}, \quad (21)$$

где σ_T – предел текучести материала; m – степень деформационного упрочнения материала, кривая деформирования которого представлена в виде:

$$\sigma_i = \sigma_T (\varepsilon_i / \varepsilon_T)^m.$$

Подставляя в соотношение (21) полученное ранее выражение (20) для определения среднего номинального напряжения σ_n после несложных математических преобразований получили:

$$a_\sigma = K_\sigma [(a_\sigma + 1) / 2\gamma]^{(m-1) / (2m)}, \quad (22)$$

где $\gamma = \sigma_T / \sigma_b$ – показатель деформационного упрочнения материала.

Данное выражение (22) является итерационным по отношению к a_σ и не решается в замкнутом виде. Приближенное решение данного уравнения (22) для двух диапазонов изменения коэффициентов концентрации K_σ , было представлено соотношениями (23) и (24):

$$1 < K_\sigma < 3; a_\sigma = 1 + [0,1 + 0,5 (1 - \gamma)] (K_\sigma - 1); \quad (23)$$

$$K_\sigma > 3; a_\sigma = 1,2 + (1 - \gamma) + 0,35 (1 - \gamma) (K_\sigma - 3).$$

При получении данных соотношений использовали связь между параметрами, характеризующими свойства материалов к деформационному упрочнению m и γ , установленную в работе [6]:

$$\gamma = [0,0054 / m]^m. \quad (25)$$

Таким образом, решена задача по установлению координат точки А, т.е. корректировки второго граничного условия, необходимого для определения наклона прямой на участке ограниченного предела выносливости материала с учетом фактора концентрации напряжений. В качестве примера на рисунке 2 приведена скорректированная единая кривая усталости сварных резервуаров с учетом наличия эффекта концентрации напряжений K_σ (при $K_\sigma = 1,5$).

С учетом скорректированных граничных условий было получено следующее выражение для определения параметра m_k , характеризующего угол наклона кривой в области ограниченной усталости:

$$\sigma_n = \sigma_b (a_\sigma + 1) / 2a_\sigma = (\sigma_0 / K_\sigma) [N_G / N_b]^{(1 / m_k)}, \quad (26)$$

откуда:

$$m_k = 5,3 / \lg [K_\sigma (a_\sigma + 1) / a_\sigma [0,57 (1 + \gamma) + 0,33]]. \quad (27)$$

Таким образом, окончательное выражение для описания единой кривой усталости материалов при наличии эффекта концентрации напряжений имеет вид:

$$\sigma_{ор} = (\sigma_0 / K_\sigma) \cdot [N_G / N_{ор}] (1 / m_k). \quad (28)$$

Литература:

1. Трощенко В.Т. Сопротивление усталости сталей и сплавов : справочник. / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – Киев : Наукова думка, 1987. – Ч. 1–2. – 324 с.
2. Циклические деформации и усталость металлов / Под ред. В.Т. Трощенко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 562 с.
3. Терентьев В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов / В.Ф. Терентьев А.А. Оксогоев. – Новосибирск : НГТУ, 2001. – 62 с.
4. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.



5. Труфьяков В.И. Усталость сварных соединений. – Киев : Наукова думка, 1973. – 216 с.
6. Трошенко В.Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев : Наукова думка, 1971. – 267 с.
7. Гареев А.Г. Особенности разрушения материалов нефтегазопроводов / А.Г. Гареев, М.А. Худяков и др. – Уфа : Издательство «Гилем», 2006. – 156 с.
8. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование : учебник для вузов / Г.А. Николаев, В.А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1990. – 446 с.
9. Кузеев И.Р. Особенности распределения магнитных свойств в материале оболочковой конструкции на начальном этапе циклического нагружения / И.Р. Кузеев и др. // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2015. – № 1. – С. 261–274.
10. Исмагилов А.З. Применение виброобработки сварных швов для снижения уровня остаточных напряжений и улучшения механических свойств металла / А.З. Исмагилов и др. // VII Научно-техническая конференция молодежи ОАО «Северные МН», 21–23 ноября 2006 года: материалы конференции. – Ухта, 2006. – С. 18.
11. Скорняков А.А. Исследования конструктивных элементов уторного шва резервуаров / А.А. Скорняков и др. // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12. – № 4. – С. 157–161.
12. Турмов Г.П. Определение коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях // Автоматическая сварка. – 1976. – № 10. – С. 14–17.
13. Ерофеев В.В. К вопросу о расчетном определении коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях оболочковых конструкций, выполненных угловыми швами / В.В. Ерофеев и др. // Сборник научн. трудов ИПТЭР. – Уфа, 2009. – С. 13–16.
14. Клыков Н.А. Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. – М. : Машиностроение, 1984. – 16 с.
15. Fairushin A.M. Technology of removing residual voltages in welded constructions / A.M. Fairushin et al. // 11th International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists; «Modern Techniques and Technologies», MTT 2005 – Proceedings 2005. – P. 68–69.
16. Шахматов М.В. Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами / М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев, В.В. Коваленко. – Челябинск : ЦНТИ, 2000. – 227 с.
17. Зайнуллин Р.С. Сертификация нефтегазохимического оборудования по параметрам испытаний / Р.С. Зайнуллин, Р.Г. Шарафиев. – М. : Недра, 1998. – 445 с.
18. Нейбер Г. Концентрация напряжений / Г. Нейбер; Пер. с нем.; под ред. А.И. Лурье. – М. : Гостехиздат, 1947. – 204 с.

References:

1. Troschenko V.T. Fatigue resistance of steels and alloys : guide. / V.T. Troschenko, L.A. Sosnovskiy. – Kiev : Naukova Dumka, 1987. – Parts 1–2. – 324 p.
2. Cyclic Deformations and Fatigue of Metals / Ed. by V.T. Troschenko. – Kiev : Naukova Dumka, 1985. – 562 p.
3. Terentev V.F. Cyclic Strength of Metallic Materials / V.F. Terentev A.A. Oksogoyev. – Novosibirsk : NGTU, 2001. – 62 p.
4. Kogaev V.P. Calculations of Machine and Structure Details for Strength and Durability. Handbook / V.P. Kogaev, N.A. Makhutov, A.P. Gusenkov. – M. : Mechanical Engineering, 1985. – 224 p.
5. Trufyakov V.I. Fatigue of Welded Joints. – Kiev : Naukova Dumka, 1973. – 216 p.
6. Troschenko V.T. Fatigue and inelasticity of metals. – Kiev : Naukova Dumka, 1971. – 267 p.
7. Gareev A.G. Features of destruction of materials of oil and gas pipelines / A.G. Gareev, M.A. Khudyakov et al. – Ufa : «Gilem» Publishing House, 2006. – 156 p.
8. Nikolaev G.A. Welded structures. Calculation and design: textbook for the universities / G.A. Nikolaev, V.A. Vinokurov. – M. : Higher School, 1990. – 446 p.
9. Kuzeev I.R. Peculiarities of Distribution of Magnetic Properties in the Material of the Shell Structure at the Initial Stage of Cyclic Loading / I.R. Kuzeev et al. // Electronic Scientific Journal of Oil and Gas Business. – 2015. – № 1. – P. 261–274.
10. Ismagilov A.Z. Application of vibration treatment of welded seams to reduce the level of osteostatic stress and improve the mechanical properties of metal / A.Z. Ismagilov et al. // VII Scientific and Technical Conference of Young People ОАО «North MN», November 21–23, 2006 : conference proceedings. – Ukhta, 2006. – P. 18.
11. Skorniakov A.A. Researches of constructive elements of a boiler joint of tanks / A.A. Skorniakov et al. // Oil and gas business. – 2014. – V. 12. – № 4. – P. 157–161.
12. Turmov G.P. Determination of stress concentration coefficients in the welded connections // Automatic welding. – 1976. – № 10. – P. 14–17.
13. Erofeev V.V. To the question of calculated determination of stress concentration coefficients in the welded joints of the shell structures made by the angular welds // V.V. Erofeev et al. // Collection of scientific papers by IPTER. – Ufa, 2009. – P. 13–16.
14. Klykov N.A. Calculation of resistance characteristics of fatigue of the welded connections. – M. : Mashinostroenie, 1984. – 16 p.
15. Fairushin A.M. Technology of removing residual voltages in welded constructions / A.M. Fairushin et al. // 11th International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists; «Modern Techniques and Technologies», MTT 2005 – Proceedings 2005. – P. 68–69.
16. Shakhmatov M.V. Workability and the non-destructive inspection of the welded connections with defects / M.V. Shakhmatov, V.V. Erofeev, V.V. Kovalenko. – Chelyabinsk : CNTI, 2000. – 227 p.
17. Zainullin R.S. Certification of Oil and Gas-Chemical Equipment by Test Parameters / R.S. Zainullin, R.G. Sharafiev. – M. : Nedra, 1998. – 445 p.
18. Neuber G. Stress concentration / Per. with him.; under edition of A.I. Lourier. – M. : Gostekhizdat, 1947. – 204 p.