

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БЕСФАСОНОЧНЫХ ТРУБЧАТЫХ УЗЛОВ

Р.Г. Губайдулин, А.К. Тиньгаев, В.А. Лупин

STRESSED STATE OF WELDED JOINTS OF TUBULAR UNITS WITHOUT GUSSET PLATE

R.G. Gubaidulin, A.K. Tingaev, V.A. Lupin

Проведены исследования напряженного состояния сварных соединений бесфасоночных трубчатых узлов поляризационно-оптическим методом. Определены «горячие» точки и коэффициенты концентрации напряжений для них с учетом геометрической неоднородности сварных швов и схем нагружения узлов.

Ключевые слова: бесфасоночный трубчатый узел, сварное соединение, коэффициент концентрации напряжений, поляризационно-оптический метод.

The stressed state of welded joints of tubular units without gusset plate are studied by polarization-optical method. “Hot” points and stress concentration factors for them are defined, taking into account the geometric heterogeneity of welded seams and loading schemes of units.

Keywords: tubular unit without gusset plate, welded joint, stress concentration factor, polarization-optical method.

В сварных конструкциях морских стационарных платформ (МСП), башен, мачт, а также в пространственных большепролетных покрытиях широко используются бесфасоночные трубчатые узлы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с традиционными решениями. Однако отсутствие достоверной информации о напряженно-деформированном состоянии таких узлов снижает точность проводимых расчетов, что в ряде случаев приводит к возникновению в них хрупких и усталостных трещин.

В бесфасоночных трубчатых узлах форма сварных швов меняется по линии сопряжения оболочек от углового до стыкового в зависимости от угла наклона патрубка к поясной трубе и отношения их диаметров. На величину коэффициента концентрации напряжений K_t угловых швов в месте перехода шва к основному металлу влияют радиус R , угол $\Theta^{лок}$, а также катет сварного шва h , толщина сопрягаемых элементов S, S_1 , величина подреза глубиной t и радиусом закругления r (рис. 1).

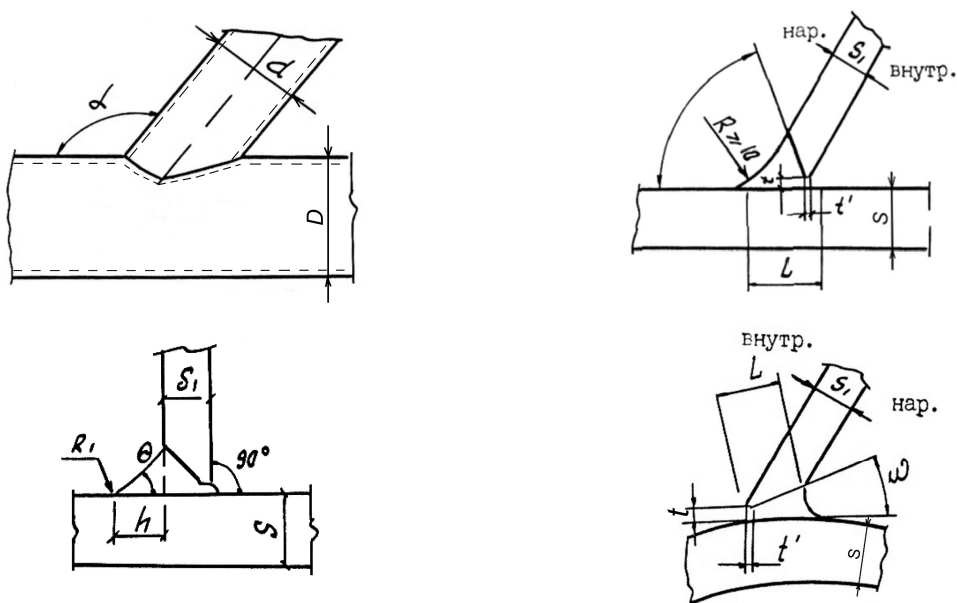


Рис. 1. Геометрические параметры сварного шва

Несмотря на большую насыщенность современных конструкций сварными соединениями, имеющими различное расположение по отношению к направлению главных напряжений, прочность конструкции в целом в большинстве случаев определяется наиболее нагруженными узловыми соединениями. В отношении бесфасоночных трубчатых узлов эпюра напряжений по линии сопряжения труб распределяется неравномерно и имеет ярко выраженный локальный характер. В связи с этим в большинстве отечественных и зарубежных нормах используется подход, основанный на определении локальных напряжений.

Максимальные локальные напряжения по этому подходу определяются следующим образом:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{ном}} K_t^s, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{ном}}$ – номинальные напряжения в раскосе; K_t^s – конструктивный коэффициент концентрации напряжений, который зависит от характера нагружения (N , M_x , M_y) и геометрических параметров узла: R/T – отношения радиуса поясной трубы к толщине ее стенки; d/D – отношения диаметров патрубка и поясной трубы; t/T – отношения толщины стенки патрубка и поясной трубы; Θ – угла наклона патрубка к поясной трубе; g – расстояния между патрубками для К-образ-

ных узлов; L/D – отношения длины к диаметру поясной трубы.

Параметрические уравнения, приведенные в работах [1, 2], дают завышенные значения коэффициентов K_t^s , поскольку определяют напряжения либо в точке пересечения осей σ_{\max}^0 (точка 0), либо в точке пересечения наружных поверхностей патрубка и поясной трубы σ_{\max}^1 (точка 1) (рис. 2).

Вместе с тем, эти уравнения не учитывают влияние геометрических параметров сварных швов на концентрацию напряжений в месте перехода углового шва к основному металлу. В результате получается, что согласно рис. 2 напряжения в точках перехода от шва к основному металлу вроде бы должны быть ниже, но в действительности в этих зонах наиболее часто возникают усталостные и хрупкие трещины. Из этого следует, что максимальные локальные напряжения должны определяться не только в зависимости от геометрических параметров узла, но и от геометрических параметров сварного шва и вычисляться по формуле

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{ном}} K_t^s K_t^w, \quad (2)$$

где K_t^w – коэффициент концентрации, учитывающий изменчивость геометрических параметров сварных швов (R , $\Theta^{\text{пок}}$, h).

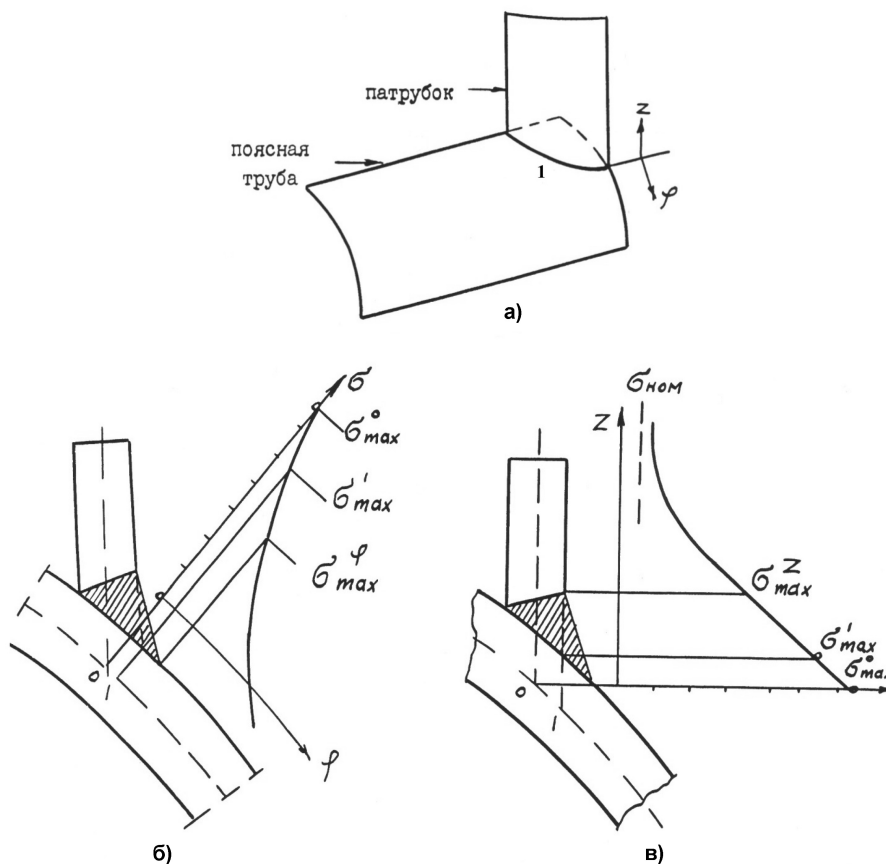


Рис. 2. Напряжения в бесфасоночном трубчатом узле: а – линия сечения оболочек (1); б – распределение напряжений σ_{\max}^{ϕ} в поясной трубе около горячей точки; в – распределение напряжений σ_{\max}^z в патрубке около горячей точки

Максимальные напряжения могут определяться и без локального коэффициента концентрации напряжений K_t^w , если сварное соединение в узле имеет плавный переход и вогнутую гладкую поверхность (без прожогов, наплывов, сужений, перерывов) с выпуклостью в пределах 0,5–3,0 мм и шириной не более 2,5 диаметров электрода, а также если не имеет наплавления, непровары, подрезы, кратеры и т. д. Указанные требования к форме шва могут быть выполнены только в результате механической или абразивной обработки. Эти операции трудоемки и требуют дополнительных затрат, поэтому в большинстве случаев узлы изготавливают без этих дополнительных операций.

В связи с тем, что геометрическая неоднородность сварного соединения влияет на напряженное состояние трубчатого узла, необходимо провести экспериментальные исследования по определению локального коэффициента концентрации.

Работа проводилась в два этапа. На первом этапе проведен статистический анализ формы сварных швов бесфасоночных трубчатых узлов, изготавливаемых на Бакинском заводе глубоководных оснований. На втором этапе работ, на основе полученных данных по геометрической неоднородности швов, были выполнены поляризационно-оптические исследования напряженно-деформированного состояния узлов.

Изучение формы угловых сварных швов проводилось на узлах с поясной трубой диаметром 1820 мм и толщиной стенки 50 мм и с патрубками диаметром 900 мм с толщиной стенки 30 мм. Патрубки примыкали к поясной трубе под углами 30, 50 и до 90°. Данные углы примыкания наиболее часто встречаются в проектируемых МСП на глубину моря 150–300 м. С данных узлов на Бакинском заводе стационарных глубоководных оснований были изготовлены слепки, с которых были измерены следующие геометрические параметры сварных швов: радиус сопряжения R и (локальный) угол перехода $\Theta^{\text{лок}}$ от основного металла поясной трубы или патрубка к металлу шва [3, 4].

Всего было сделано 226 замеров R и $\Theta^{\text{лок}}$ для поясной трубы, т. е. параметры перехода от основного металла поясной трубы к сварному шву, а также 82 замера R и $\Theta^{\text{лок}}$ для патрубка – параметры перехода от основного металла патрубка к сварному шву. Результаты замеров представлены в таблице.

В результате проведенных исследований установлена крайняя нестабильность формы сварного шва. Выявлены пределы разброса радиуса сопряжения и угла перехода от основного металла поясной трубы и патрубка к сварному шву. Полученные данные были приняты во внимание при изготовлении моделей для поляризационно-оптических исследований и в дальнейших расчетах коэффициентов концентрации напряжений.

Выбор поляризационно-оптического метода был обусловлен поставленной задачей – получить достаточно точное распределение напряжений по зоне примыкания патрубка к поясной трубе, выявить «горячие» точки сварного шва при различных схемах нагружения патрубков и определить коэффициент концентрации напряжений в этих точках, что необходимо для оценки долговечности узла МСП.

Исследования проводились на объемных составных моделях с оптически чувствительными вклейками. Для прозрачных частей модели применялось органическое стекло (полиметилметакрилат), в качестве оптически чувствительной вставки применялся оптически чувствительный материал на основе эпоксидной смолы ЭД-16М.

При выборе используемого материала принимались во внимание следующие требования, необходимые для обеспечения достаточной точности полученных результатов:

- модули упругости составных элементов модели, оптически нечувствительного материала (ОНМ) и оптически чувствительных вставок должны быть достаточно близкими;

- используемый при моделировании материал должен обеспечивать незначительное различие коэффициентов Пуассона материала модели и натуральных узлов из стали.

Для исследования клееных трубных моделей поляризационно-оптическим методом был разработан и изготовлен стенд, позволяющий реализовать сложные схемы нагружения, приближенные к действительной работе узлов МСП [4]. Стенд включает нагрузочное устройство со специальной ванной с иммерсионной жидкостью для клееных моделей и систему оптико-механических измерителей и обеспечивает следующие виды стационарного ступенчатого нагружения:

- сжатие поясной трубы с растяжением патрубка;

Результаты замеров геометрических параметров формы угловых сварных швов
бесфасоночных трубчатых узлов

Зона перехода	Исследуемые параметры	$X_m \pm S_x$
К поясной трубе	R , мм	$1,61 \pm 49$
	$\Theta^{\text{лок}}$, рад	$0,53 \pm 03$
К патрубку	R , мм	$1,87 \pm 0,51$
	$\Theta^{\text{лок}}$, рад	$0,47 \pm 0,01$

– сжатие поясной трубы с растяжением и изгибом патрубка в плоскости узла.

Нагрузочное устройство позволило осуществить различные соотношения усилий и изгибающих моментов в патрубке и поясной трубе. Схема нагрузочного устройства стенда показана на рис. 3, где основные узлы стенда смонтированы на сварном жестком основании 1. Нагрузочное устройство выполнено в виде рамы 2, в рабочем пространстве которой установлена ванна 3 с прозрачными стенками и жестким несущим дном для установки и нагружения трубчатых моделей. Исследуемая клееная трубчатая модель 10 устанавливалась в ванну 3 с иммерсионной жидкостью 12. Усилие сжатия P в поясной трубе осуществлялось винтовым домкратом 4 через динамометр 13, шаровую опору 14 и упорную крышку 11. Передаваемое усилие P фиксировалось динамометром 13.

Усилие растяжения Q и изгибающий момент M в патрубке осуществлялся винтовым домкратом 5 через рычажно-тросовую систему 7. Трос 8 был шарнирно закреплен в пробке 15 патрубка и через блок 9 связан с рычагом 7. Блок установлен в пазах регулируемой балки укосины 6.

В качестве иммерсионной жидкости использовалась смесь из вазелинового масла и α -бромнафталина в пропорции 10 : 1, коэффициент преломления которой равен коэффициенту преломления ОНМ, что позволило получить эффект исчезновения «объемности» модели и улучшило условия просмотра картин изохром.

Для просмотра получаемых картин изохром использовали полярископ «Цейс-300», представляющий собой оптический измеритель диффузионного типа с рабочим полем, равным 300 мм.

В результате проведенных исследований была установлена следующая особенность работы узлов с патрубками, примыкающими под углами 30, 50 и 90°.

1. Вследствие существующей разделки кромок под сварку в пяточной зоне узлов с углом примыкания патрубка 30 и 50° при нагружении патрубка появляется местный изгибающий момент, вызванный эксцентриситетом приложения продольной силы, который существенно влияет на напряженное состояние в сварном шве. Причем степень и характер влияния локального момента зависит от схемы и величины нагружения патрубка.

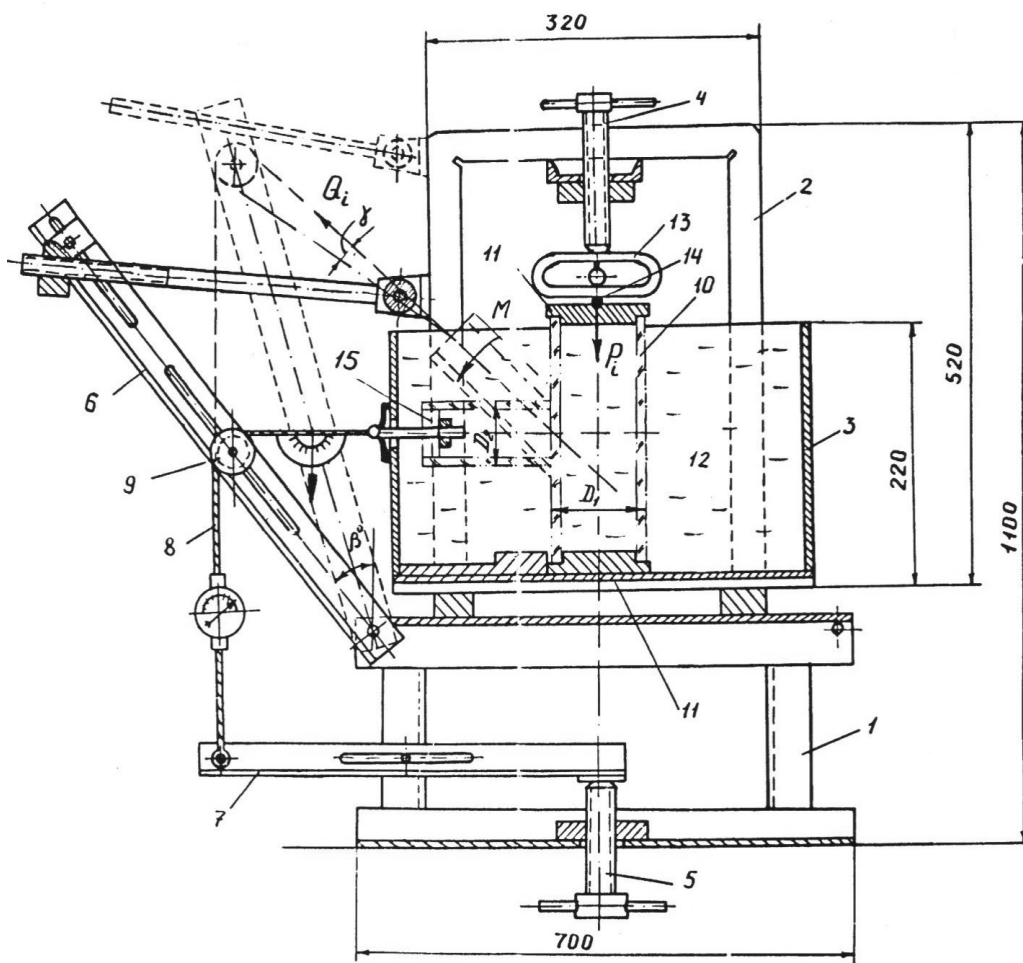


Рис. 3. Схема нагрузочного стенда для испытаний Т- и У-образных узлов объемных трубчатых моделей в иммерсионной жидкости

2. При испытании модели, имитирующей узел с углом примыкания патрубка 30° , по схеме нагружения – сжатие поясной трубы и растяжение патрубка – наиболее нагруженной для носковой зоны является точка перехода от сварного шва к поясной трубе. Коэффициент концентрации в этой точке равен 2,2. В пяточной зоне для данной схемы наиболее нагруженной является точка перехода от сварного шва к патрубку, в ней коэффициент концентрации достигает 1,53.

Эти же точки остаются наиболее опасными и при других схемах нагружения узла (растяжение патрубка с изгибом по часовой и против часовой стрелки). Напряжения в них возрастают в 1,5–4 раза по сравнению с напряжениями в трубке.

3. При испытании модели, имитирующей узел с углом примыкания патрубка 50° , по схеме нагружения – сжатие поясной трубы и растяжение патрубка – наиболее нагруженной для носковой зоны является точка перехода от сварного шва к поясной трубе. Коэффициент концентрации в этой точке равен 2,6. В пяточной зоне для данной схемы наиболее нагруженной является точка перехода от сварного шва к патрубку, в ней коэффициент

концентрации достигает 2,8, а в корне сварного шва этой зоны – 1,8.

Эти же точки остаются наиболее опасными и при других схемах нагружения узла (растяжение патрубка с изгибом по часовой и против часовой стрелки). Напряжения в них возрастают в 3,5–4,3 раза по сравнению с напряжениями в трубке, а коэффициент концентрации напряжений достигает 5,2 (рис. 4, б–г).

4. При испытании модели, имитирующей узел с углом примыкания патрубка 90° , по схеме нагружения – сжатие поясной трубы и растяжение патрубка – наиболее нагруженной точкой сварного шва в исследуемом сечении является точка перехода от сварного шва к патрубку. Коэффициент концентрации в этой точке равен 2,49.

При нагружении патрубка продольной силой и изгибающим моментом часть стенки поясной трубы как более податливая изгибается, вследствие чего напряжения в точках сварного шва не возрастают. Коэффициент концентрации в них достигает 1,5–2,1.

Проведённые исследования свидетельствуют о нестабильности формы сварного шва и влиянии ее на напряженное состояние трубчатых узлов.

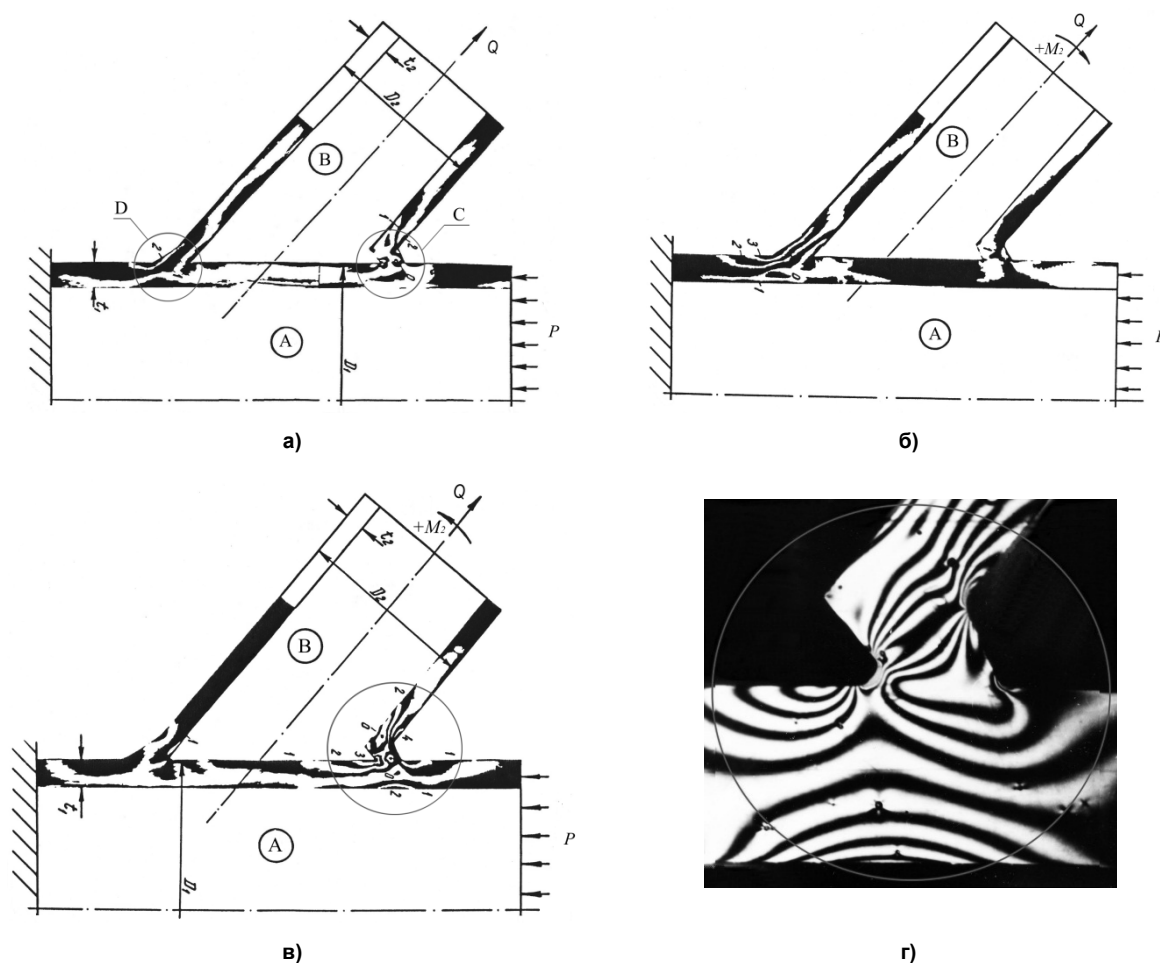


Рис. 4. Картина линий изохром при нагружении объемной модели узла с углом примыкания патрубка 50° :
А – поясная труба; В – патрубок; С – пяточная зона; D – носковая зона

Коэффициент концентрации, определенный с учетом фактической геометрии сварного шва, возрастает в «горячих» точках в 2,5–3 раза. Поэтому неучет этих факторов может привести к образованию трещин в зоне перехода от шва к основному металлу трубчатых узлов.

Литература

1. Kuang, I.G. *Stress concentration in tubular joints* / I.G. Kuang, R.D. Leick, A.B. Potvin // *Paper OTC 2205, Proc. 7th offshore technology conference*. – Houston, Texas, 1975. – P. 593–612.

2. Wodsworth, A.C. *Stress Concentration at unstiffened tubular joints* / A.C. Wodsworth, G.P. Smedley //

European offshore steels Res. Seminar. – Cambridge, UK, 27–29 Nov. 1978. Cambridge. – IX/P31–1 – IX/P31–7.

3. *Влияние технологических и конструктивных факторов на несущую способность сварных соединений морских стационарных платформ* / Р.Г. Губайдулин, А.К. Тиньгаев, М.Р. Губайдулин, Е.М. Пиеничникова // *Технология судостроения*. – 1990. – № 9. – С. 79–84.

4. Губайдулин, Р.Г. *Расчетная оценка влияния технологии изготовления и условий эксплуатации на сопротивление усталостному и хрупкому разрушению морских стационарных платформ: дис. ... д-ра техн. наук* / Р.Г. Губайдулин. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – 530 с.

Поступила в редакцию 27 декабря 2011 г.