

УДК 622.276.04

## О РЕЗУЛЬТАТАХ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕРЕМЕННЫХ И УСЛОВНО СТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА РАЗВИТИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЙ (МНГС)

Староконь И.В.

*Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина,  
Москва, e-mail: starokon79@mail.ru*

В статье рассматривается влияние температурных полей на напряженное состояние морских нефтегазовых сооружений. Дается определение условно стационарного и переменного температурных полей и описывается область их применения. Отмечается, что для морских нефтегазовых сооружений отсутствует теория, которая позволяла бы численно описать природу и механизм воздействия как условно стационарных, так и переменных температурных полей. Анализ различных источников литературы показал, что в настоящее время имеются решения по динамике распространения напряженного состояния для осесимметричного температурного поля, для неосесимметричного случая, характерного для условий эксплуатации опорных блоков морских платформ, такое решение отсутствует. Помимо этого в проанализированных решениях не учитывается наличие коррозионного слоя и слоя лакокрасочного покрытия и их влияние на динамику распространения температурных полей. Автором отмечается, что при возникновении разницы температур между внутренней и наружной стенками конструктивного элемента МНГС возникает температурное напряжение. Автором предлагается применить существующие в различных областях науки теории для численного моделирования динамики температурного поля и величины возникающих при их действии температурных напряжений. Автором было проведено численно-аналитическое моделирование воздействия как переменных, так и условно стационарных полей, что позволило выявить ряд закономерностей. Полученные величины температурных напряжений будут в дальнейшем использованы для оценки динамики развития усталостных трещин на МНГС.

**Ключевые слова:** усталостные трещины, морские нефтегазовые сооружения, температурное, воздействие, поля, условно стационарное переменное напряжение

## ABOUT THE RESULTS OF A NUMERICAL-ANALYTICAL MODELING THE IMPACT OF VARIABLES AND CONDITIONAL-STATIONARY TEMPERATURE FIELDS ON THE DEVELOPMENT OF FATIGUE CRACKS OFFSHORE OIL AND GAS INSTALLATIONS

Starokon I.V.

*Russian State oil and gas university named after I.M. Gubkin, Moscow, e-mail: starokon79@mail.ru*

The article examines the impact of temperature fields on the stress state of the offshore oil and gas installations. Definition is given to the conditionally fixed and variable temperature fields and describes the scope of their application. It is noted, that for the offshore oil and gas installations there is no theory, which would allow numerically describe the nature and mechanism of action as conditionally fixed, so as variable temperature fields. The analysis of different sources of literature has shown that at the present time, there is a solution on the dynamics of the distribution and of the stress condition for symmetrical about the axis of the temperature field, for no symmetrical about the axis of the case, characteristic for the operating conditions of thrust blocks offshore platforms such solution does not exist. In addition to this in the analysed decisions are not taken into account the presence of corrosion layer and a layer of paint, and their influence on the dynamics of the temperature fields. The author notes that in case of difference in temperature between the inner and outer walls of a constructive element offshore installations arises temperature stress. The author proposes to apply existing in various fields of science theory for numerical simulation of dynamics of the temperature field and the values arising during their operation temperature stresses. The author was held numerical-analytical modeling of the impact of both variables, and conditionally fixed fields, which allowed to identify a number of regularities. The obtained values of temperature stresses will be used to assess the dynamics of the development of fatigue cracks on of the offshore oil and gas installations.

**Keywords:** fatigue cracks, offshore oil and gas structures, thermal, impact, fields, relatively stationary, variable, stress

В течение всего срока эксплуатации МНГС подвергаются воздействию различных температурных полей, вызывающих изменения их напряженного состояния. Переменные напряжения вызывают развитие одного из самых опасных дефектов-усталостных трещин (УТ). Поэтому задача определения влияния температурных воздействий на развитие усталостных трещин сводится к определению величин перемен-

ных напряжений, возникающих в различных сечениях морских нефтегазовых сооружений при действии на них температурных полей. Следует также отметить, что и статические напряжения также влияют на развитие УТ, и этот вопрос будет рассмотрен позже. В настоящее время это явление применительно к МНГС практически не изучено, поэтому исследование влияния температурных полей на развитие усталостных

трещин является важной и актуальной задачей. Морские сооружения подвергаются воздействию двух разных по типу температурных полей:

1. Условно стационарное температурное поле применимо к морским нефтегазопроводам и характеризуется тепловым полем перекачиваемого по ним продукта, незначительно изменяется во времени, вызывая длительные постоянные напряжения, обусловленные разницей между температурными полями внутренней и наружной стенок трубы. Особенностью этого поля является то, что чаще всего оно осесимметричного.

2. Переменное температурное поле применимо к тем конструктивным элементам МНГС, по которым не производится перекачка нефти и газа, например, опорный блок морской стационарной платформы, и температурное поле которого определяется лишь исходя из условий окружающей среды. Переменное температурное поле характеризуется своими частыми изменениями и вызываемыми им переменными напряжениями. Это поле также может быть осесимметричным, но чаще всего таковым не является, т.к. в значительной мере зависит от воздействия солнечной радиации, волнового воздействия, влияния морских течений, скорости и направления ветра, температуры окружающей среды, условий конвекции в окружающую среду и т.д. В случае полного штиля, слабого волнового воздействия и малых скоростей течений теплообмен происходит в условиях свободной конвекции и зависит от критериев Грасгофа и Прандтля [1]. В противном же случае теплообмен происходит путем вынужденной конвекции и определяется критерием Рейнольдса [1]. Как это показано в работе [1], тепловой режим при скоростях ветра около 20 м/с значительно влияет на температурное поле перекачиваемого продукта. Помимо этого изменение условий освещенности конструктивных элементов МНГС, связанное как с метеорологическими, так и с их конструктивными особенностями, приводят к чередованию понижения и повышения температуры. В работе [1] доказано, что, например, разница потребляемой мощности перекачки нефти по трубопроводам, подверженным воздействию солнечной радиации, в дневном и в ночном режимах составляет 10%. Также следует отметить, что на температурный режим трубопроводов влияет геометрическая форма и изменение давления транспортируемого продукта. Автором исследовался участок газопровода, находящегося под давлением 55 атм., длиной 1,17 м и представляюще-

го собой четыре последовательно сваренных между собой переходника диаметром 108×159, 159×219, 219×273, 273×325 мм. В результате было установлено, что температура наружной поверхности газопровода в начале на участке переходника диаметром 108 мм на 1,6°C отличается от температуры поверхности на участке переходника диаметром 325 мм. Это можно объяснить эффектом дросселирования, что также подтверждается многочисленными случаями обледенения газопровода, происходящими даже при температуре окружающего воздуха выше + 35°C на участках выхода регуляторов давления, когда давление с 55 атм. снижалось до 1,7 атм.

Первым шагом, который необходимо сделать для определения величины температурных напряжений, является определение температурного поля конструктивного элемента МНГС (как элемента опорного блока МСП, так и морского трубопровода). Анализ большого количества источников специализированной литературы [1, 2, 3, 4] показал, что к настоящему моменту отсутствует решение задачи, которое учитывало бы неравномерный нагрев конструктивных элементов МНГС, влияние на распространение температурного поля слоя лакокрасочного покрытия и коррозионного слоя. Решения задач сводятся к определению тепловых полей, возникающих при разнице температур между внешней и наружной стенкой трубы при воздействии осесимметричного температурного поля (ОСТП). Детальное описание этих решений приведено в работах [1, 2, 3, 4, 5]. Поэтому автором в настоящее время проводится эксперимент, который позволит установить закон динамики распространения температурного поля по всей поверхности конструктивного элемента МНГС при наличии коррозионных слоев и слоя лакокрасочного покрытия, а также учесть влияние воздействий окружающей среды. Также планируется разработать решение, определяющее динамику температурного поля для неосесимметричного случая. В настоящей же статье сфокусируемся на напряжениях, возникающих при воздействии ОСТП при наличии температурного градиента между внутренней и наружной поверхностями конструктивного элемента МНГС. Опираясь на данные, приведенные в [4], автором предлагается для условно стационарного осесимметричного температурного поля принять логарифмический закон распределения температуры по толщине стенки конструктивного элемента МНГС, а для переменного осесимметричного температурного поля использовать ли-

нейный закон. В математическом выражении это выглядит так [4]:

$$f[T(r)] = \begin{cases} T_1 - (T_1 - T_2) \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln(r_2/r_1)}; \\ T_1 - (T_1 - T_2) \frac{r - r_1}{r_2 - r_1}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $f[T(r)]$  – функция распределения температуры по сечению конструктивных элементов МНГС;  $T_1$  и  $T_2$  – температура на внутренней и наружной поверхности конструктивного элемента МНГС соответственно;  $r$  – рассматриваемая координата, расположенная внутри сечения исследуемого конструктивного элемента МНГС;  $r_1$  и  $r_2$  – внутренний и наружный диаметры.

Рассмотрим опорный блок морской платформы, разделив его на следующие условные зоны: надводная, переменного смачивания и подводная. Проведем анализ надводной зоны. На первый взгляд казалось бы, что температурное поле в этой зоне определяется температурой атмосферы. Однако, как показали проведенные на МСП замеры, температура конструктивных элементов МНГС сильно зависит от солнечной радиации, и их фактическая температура в вершине цикла (т.е. максимальная температура) в самый жаркий период года составляет порядка  $+82,5^\circ\text{C}$ . Помимо этого существенное влияние оказывает ветровое воздействие. Отметим, что фактическое состояние МСП имеет многочисленные сквозные повреждения, что позволяет выполнить замеры как с наружной, так и с внутренней поверхности конструктивных элементов МСП. Измерения проводились при помощи инфракрасного пирометра AR 330 с точностью измерений  $0,1^\circ\text{C}$ . Полученные в результате измерений данные говорят о том, что разница температурного поля между внутренней и наружной поверхностью конструктивных элементов МСП в некоторый момент времени достигают  $1,7^\circ\text{C}$ , однако впоследствии практически выравниваются. Это объясняется динамикой температурного поля, главным определяющим фактором которого является воздействие солнечной радиации, и временем, которое необходимо для достижения приблизительно равных температур между внутренней и наружной поверхностями конструктивных элементов

МСП. При отсутствии воздействия солнечной радиации и существенного ветрового воздействия температурное поле МСП определяется состоянием атмосферы. Анализ архивных данных показал, что максимальная температура атмосферы в районе Субботинского месторождения достигала значения  $+31,5^\circ\text{C}$ , а минимальное зафиксированное –  $-13,5^\circ\text{C}$ . Для подводной части МСП наиболее сильные колебания температур отмечаются на глубинах до 50 метров, ниже этой отметки изменения температуры практически не происходят. По данным проекта, начиная с зоны глубиной от 50 метров температура практически не меняется и находится в пределах  $+8^\circ\text{C}$ . И до глубины 1500 метров температура находится приблизительно в пределах  $+9^\circ\text{C}$ . Это говорит о том, что с увеличением глубины влияние переменных температурных напряжений на развитие усталостных разрушений падает. Результаты их расчета будут приведены ниже. Анализируя данные, можно сказать, что температурный режим моря на глубине до 30 метров определяется, в первую очередь, фактором температуры атмосферного воздуха. Постепенно, с увеличением глубины до 50 метров, влияние этого фактора падает, и температура приближается к постоянной отметке  $+9$  градусов Цельсия. Если же рассуждать о зоне переменного смачивания, то температура в этой зоне при отсутствии существенного волнового воздействия будет соответствовать либо атмосферной, либо подводной зоне в зависимости от расположения конструктивного элемента МНГС. В случае же существенного волнового воздействия температура конструктивного элемента МНГС будет стремиться к температуре морской воды.

Перейдем к решению задачи определения напряжений, вызванных разницей температуры между внутренней и наружной поверхностью конструктивного элемента МНГС, имеющего трубную форму, с наружным и внутренним радиусами соответственно  $r_2$  и  $r_1$ . В таком конструктивного элемента МНГС при описанных выше температурных условиях эксплуатации возникает температурное поле  $T(r, t)$ , сопровождаемое напряжением. Температурное поле определяется исходя из уравнений, описанных выше. А напряжения, вызываемые переменным осесимметричным температурным полем определяются по формулам, приведенным в [4]:

$$\sigma_0 = \frac{\alpha \Delta T E}{3(1-\mu)(r_2 - r_1)} \left[ 2r + \frac{r_1^3}{r^2} - \left( 1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) \left( \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha \Delta T E}{3(1-\mu)(r_2 - r_1)} \left[ 3r - 2 \left( \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} \right) \right], \quad (3)$$

где  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  – радиальные, кольцевые и продольные напряжения;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения металла трубы;  $E$  – модуль упругости материала трубы;

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha \Delta T E}{2(1-\mu) \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \left[ 1 - \ln \frac{r_2}{r} + \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha \Delta T E}{2(1-\mu) \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \left[ 1 - 2 \ln \frac{r_2}{r} - 2 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right], \quad (5)$$

где значения те же, что и в формулах (2)–(3). В зависимости от того, какая температура будет больше на внутренней или наружной стенке нефтепровода, будут менять свой знак и направление возникающие напряжения. При положительном перепаде температур

$\Delta T$  – расчетный перепад температур;  $r_2$  и  $r_1$  – наружный и внутренний радиус трубы;  $\mu$  – коэффициент Пуассона. В случае условно стационарного осесимметричного температурного поля возникающие напряжения определяются по формулам, приведенным в [4]:

$\Delta T$  опасными являются точки на внутренней поверхности трубы, при отрицательном  $\Delta T$  – внешней [4]. Перейдем к практическим расчетам. Приведем некоторые характеристики сталей, используемых в конструктивных элементах МНГС (таблица).

Характеристика сталей конструктивных элементов МНГС по данным ПНАЭ Г-7-002-86

Сталь	Эксплуатационная температура МНГС										$\alpha$ , $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	$\mu$
	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50		
	Модуль упругости $E$ , ГПа ( $10^4$ Н/мм $^2$ )											
ВстЗсп5, Ст10, Ст20	20,6	20,5	20,4	20,3	20,2	20,1	20	19,9	19,8	19,7	11,5	0,28
09Г2С, 17Г1С	21,6	21,5	21,4	21,3	21,2	21,1	21	20,9	20,8	20,7	11,5	0,30

Исходя из приведенных выше зависимостей автором было проведено численно-аналитическое моделирование для широкого диапазона конструктивных элементов МНГС, начиная с диаметра 89 мм и заканчивая диаметром 1300 мм с различными толщинами стенок. В результате этих расчетов были установлены величины возникающих по толщине стенки напряжений при на-

личии разницы температур между внешней и внутренней поверхностями. Расчеты проводились в градусах с следующими шагами разности температур  $\Delta T = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ . Шаг по толщине стенки конструктивного элемента выбран равным 1 мм. Результаты расчетов кратко проиллюстрированы на графиках (рис. 1–4).

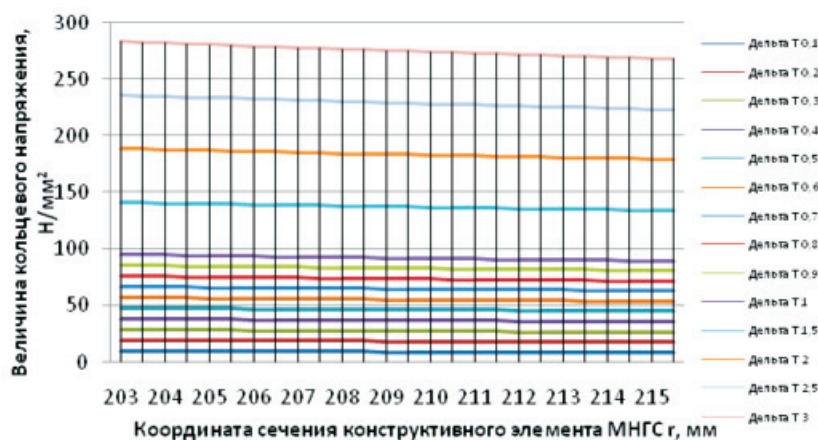


Рис. 1. Распределение кольцевых напряжений по сечению конструктивного элемента МНГС диаметром 430 мм и толщиной стенки 12 мм при воздействии переменного осесимметричного температурного поля

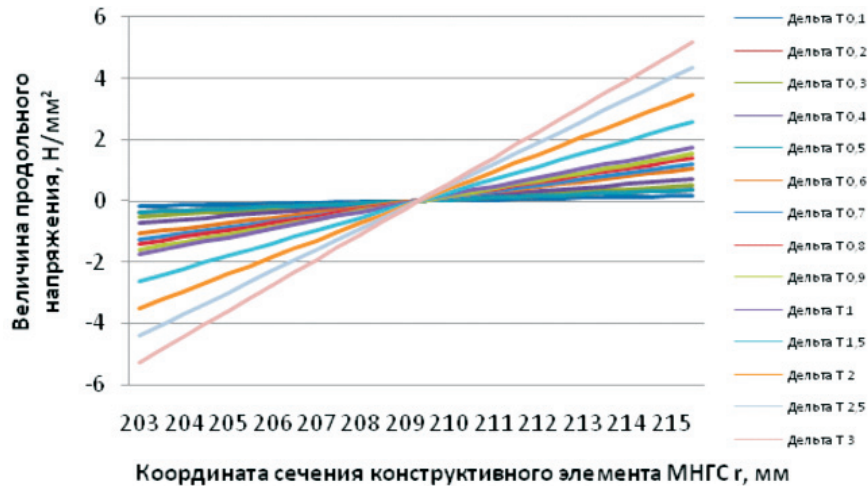


Рис. 2. Распределение продольных напряжений по сечению конструктивного элемента МНГС диаметром 430мм и толщиной стенки 12мм при воздействии переменного осесимметричного температурного поля



Рис. 3. Распределение кольцевых напряжений по сечению конструктивного элемента МНГС диаметром 430мм и толщиной стенки 12мм при воздействии условно стационарного осесимметричного температурного поля

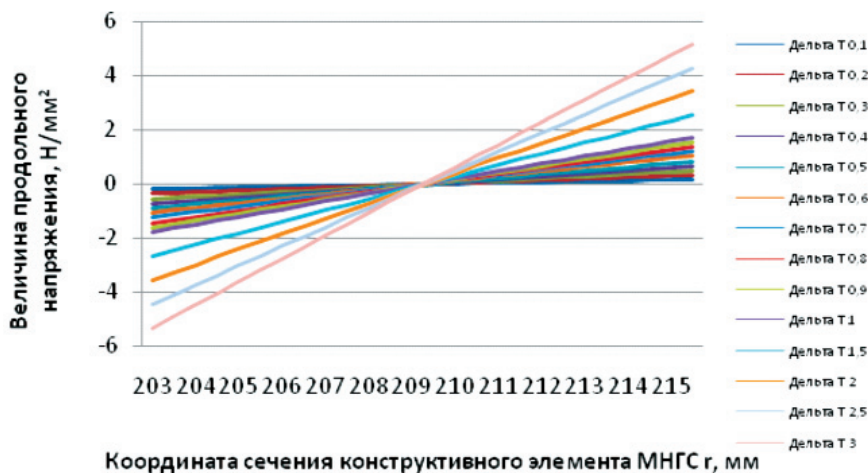


Рис. 4. Распределение продольных напряжений по сечению конструктивного элемента МНГС диаметром 430мм и толщиной стенки 12мм при воздействии условно стационарного осесимметричного температурного поля

Основываясь на проведенных расчетах, можно сделать следующие выводы:

а) введено понятие переменного и условно стационарного температурного поля, дана их характеристика и определена область применения;

б) величина возникающих температурных напряжений МНГС зависит от характеристик материала, воздействия солнечной радиации, волнового воздействия, влияния морских течений, скорости и направления ветра, температуры окружающей среды, условий конвекции в окружающую среду, величины изменения температурного поля и других факторов окружающей среды;

в) с понижением эксплуатационной температуры МНГС увеличивается значение температурных напряжений, что объясняется увеличением модуля упругости, также зависящего от эксплуатационной температуры;

г) при возникновении разницы температур между внутренней и наружной стенками конструктивных элементов МНГС возникают кольцевые, продольные и радиальные напряжения, наибольшие значения из которых принимают кольцевые напряжения, имеющие порядок  $10^2$  Н/мм<sup>2</sup>. Продольные напряжения принимают порядок  $10$  Н/мм<sup>2</sup>, что также следует учитывать;

д) радиальные напряжения, распространяясь по сечению конструктивного элемента МНГС, наибольших значений достигают в середине стенки и имеют порядок  $0,1$  Н/мм<sup>2</sup>, что позволяет в дальнейшем их не учитывать;

е) кольцевые напряжения в случае условно стационарного температурного поля равномерно распространяются по сечению конструктивного элемента МНГС, изменяясь только в зависимости от величины  $\Delta T$ . В случае переменного температурного поля кольцевые напряжения линейно изменяются по сечению конструктивного элемента МНГС, увеличиваясь или уменьшаясь от внутренней поверхности к внешней в зависимости от величины  $\Delta T$ . С увеличением диаметра, но при равной толщине стенки и одинаковых условиях окружающей среды, величина кольцевых напряжений убывает как для условно стационарного, так и переменного температурного поля. С уменьшением толщины стенки, но при равном диаметре и одинаковых условиях окружающей среды, величина кольцевых напряжений возрастает как для условно стационарного, так и переменного температурного поля;

ж) продольные напряжения как в случае условно стационарного, так и пере-

менного температурного поля линейно распространяются по сечению конструктивного элемента МНГС, стремятся к нулевым значениям в середине стенки конструктивного элемента МНГС и достигают своих максимальных значений в сечениях, близких к наружной и внутренней поверхностям. При этом имеют противоположные направления. Величина продольных напряжений находится в зависимости от величины  $\Delta T$ . С увеличением/уменьшением диаметра, но при равной толщине стенки, точно так же, как с уменьшением/увеличением толщины стенки, но при равном диаметре и при одинаковых условиях окружающей среды величина продольных напряжений мало изменяется как для условно стационарного, так и переменного температурного поля.

### Список литературы

1. Агапкин В.М., Кривошеин Б.Л. Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. – М.: Недра, 1981. – 256 с.
2. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учебник для вузов. Ч. 1. Конструирование. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 555 с.
3. Коваленко А.Д. Основы термоупругости: учебник для вузов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 308 с.
4. Окопный Ю.А. Механика материалов и конструкций: учебник для вузов / Ю.А. Окопный, В.П. Радин, В.П. Чирков. – М.: Машиностроение, 2001 – 408 с.
5. Староконь И.В. Основы теории и практики образования усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – URL: <http://www.science-education.ru/104-6605>.

### References

1. Agapkin V.M., Krivoshein B.L. Teplovoy i gidravlicheskij rascheti truboprovodov dlya nefi i nefteproduktov. M.: Nedra, 1981. 256 p.
2. Borodavkin P.P. Morskie neftegazovyye sooruzheniya. Uchebnik dlya vuzov. Chast 1. Konstruirovaniye. M.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. 555 p.
3. Kovalenko A.D. Osnovy termouprugosti. Uchebnik dlya vuzov. Kiev: Naukova dumka, 1970. 308 p.
4. Okopnyiy Yu.A. Mehanika materialov i konstruktivnyy. Uchebnik dlya vuzov / Okopnyiy Yu.A., Radin V.P., Chirkov V.P. M.: Mashinostroeniye, 2001. 408 p.
5. Starokon I.V. Osnovy teorii i praktiki obrazovaniya ustalostnyih treschin na morskikh neftegazovyih sooruzheniyah // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. no. 4.

### Рецензенты:

Бородавкин П.П., д.т.н., профессор, генеральный директор АО «Интергаз», г. Москва;

Литвин И.Е., д.т.н., генеральный директор ООО «СТД», г. Москва.

Работа поступила в редакцию 26.11.2012.