

УДК 622.242.422 622.276.04 622.279.04

DOI: 10.46548/21vek-2020-0952-0029

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ
ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ПРИМЕРЕ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ**
© 2020

Староконь Иван Викторович, кандидат технических наук,
заведующий кафедрой "Автоматизации проектирования сооружений нефтяной и газовой промышленности"
*Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»*
(119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, E-mail: starokon79@mail.ru)

Аннотация. В мире активно разрабатываются шельфовые месторождения нефти, газа и других полезных ископаемых. Для разработки морских месторождений используются различные гидротехнические сооружения, среди которых отдельно следует выделить морские стационарные платформы. Эти платформы расположены на открытых морских участках и подвергаются воздействию от тепловых потоков от солнца. Решение проблемы оценки тепловых воздействий на открытые металлоконструкции морской платформы важен потому, что даже незначительные тепловые напряжения значительно увеличиваются в зонах трещиноподобных дефектов, формируя при этом зоны локального перенапряжения. Помимо этого, определение температур стенок резервуаров, расположенных на платформе, чрезвычайно важно при определении возможности вспышки горючих жидкостей и иных легко воспламеняющихся веществ. Ранее автором была разработана методика, позволяющая рассчитать температуру любых металлоконструкций цилиндрической формы под действием солнечного излучения. В работе автором приводится сравнительный анализ собственной методики оценки тепловых воздействий и метод определения теплового состояния на основе решения уравнения теплового баланса. На основании проведенных исследований делается вывод о локальных перенапряжениях и оценивается возможность вспышки хранимых легковоспламеняющихся продуктов.

Ключевые слова: морские, стационарные, платформы, температура, самовоспламеняющиеся вещества, теплообмен, дефекты, напряжения.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS FOR ASSESSING THE THERMAL STATE OF CIVIL
CONSTRUCTION FACILITIES ON THE EXAMPLE OF MARINE STATIONARY PLATFORMS**

© 2020

Starokon Ivan Viktorovich, candidate of Technical Sciences,
head of the Department of Automation of Designing of Oil and Gas Industry Structures
Russian State University of Oil and Gas (national research university) named after I.M. Gubkin "
(119991, Moscow, Leninsky Prospekt, building 65, building 1, E-mail: starokon79@mail.ru)

Abstract. Offshore oil, gas and other minerals are being actively developed in the world. Various hydraulic structures are used for the development of offshore fields, among which offshore fixed platforms should be singled out separately. These platforms are located in open sea areas and are exposed to heat from the sun. Solving the problem of assessing thermal effects on open metal structures of an offshore platform is important because even insignificant thermal stresses increase significantly in zones of crack-like defects, thus forming zones of local overvoltage. In addition, the determination of the temperatures of the walls of the tanks located on the platform is extremely important in determining the possibility of an outbreak of flammable liquids and other highly flammable substances. Previously, the author developed a technique that allows calculating the temperature of any cylindrical metal structures under the influence of solar radiation. In the work, the author provides a comparative analysis of his own methodology for assessing thermal effects and a method for determining the thermal state based on solving the heat balance equation. Based on the studies carried out, a conclusion is made about local overvoltages and the possibility of an outbreak of stored flammable products is assessed.

Keywords: sea, stationary, platforms, temperature, self-inflating substances, heat transfer, defects, stresses.

Введение. Добыча нефти и газа ведется в сложных условиях, которые характеризуются высокой коррозионной активностью, значительными температурными и силовыми воздействиями, негативным воздействием со стороны добываемого и транспортируемого продуктов [1-5]. Большое значение имеют температурные воздействия, которые имеют значительное влияние на здания и сооружения различного назначения [6-13]. Особенно сильно влияние этих воздействий проявляется на различных металлоконструкциях, что требует учета этих воздействий при проектировании, строительстве и эксплуатации. В настоящее время в мире

активно применяются металлоконструкции различного назначения, в том числе и морские стационарные платформы. Данные сооружения являются опасными производственными объектами для которых высок риск возникновения аварийных ситуаций. Особенностью данных сооружений является их расположение на открытых не затенённых участках под действием солнечного излучения. Действие тепловых потоков от солнечного излучения приводит к формированию в них различных тепловых эффектов, в том числе и температурных напряжений. Ввиду того, что эти напряжения не являются постоянными, и при наличии

опасных коррозионных или трещиноподобных дефектов могут формировать зоны с локальными перенапряжениями, чрезвычайно важно еще на стадии проектирования оценить риски тепловых повреждений на элементы платформ. Так автором были рассчитаны коэффициенты концентрации напряжения при различной протяженности и глубине трещины в морской платформе (табл.1).

Таблица 1- Коэффициенты концентрации напряжения при различной протяженности и глубине трещины в платформе

Глубина трещины, мм	Длина трещины, мм					
	5	10	20	30	40	50
1	1,5	1,6	1,8	1,8	1,9	1,9
2	1,6	2,2	2,4	2,5	2,6	2,6
3	1,6	2,4	2,9	3,1	3,3	3,4

Величину переменных температурных напряжений $\Delta\sigma$ можно рассчитать по формуле:

$$\Delta\sigma = E\alpha\Delta T, \quad (1)$$

Где: α – коэффициент линейного расширения металла трубы; E – модуль упругости материала трубы; ΔT – расчетный перепад температур.

Морские стационарные платформы на открытых морских акваториях изображены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Морские стационарные платформы на открытых морских акваториях

Как это было сказано выше повреждениям от температурных воздействий в наибольшей степени подвержены элементы, расположенные на открытых пространствах либо вблизи источников тепловыделения [14, 15]. Так например, аномально высокая температура лета 2010 года в центральной части России привела к растрескиванию алюминиевых профилей стеклопакетов, искривлению стальных рельсовых путей наземного железнодорожного транспорта, обрушению металлического настила крыш в производственных помещениях и иным разрушениям. Поэтому определение температуры металлоконструкции является важной и актуальной задачей. Помимо этого, на морских платформах содержится легковоспламеняющиеся и горючие вещества. Как правило, эти вещества находятся в резервуарах цилиндрической формы и также подвергаются воздействию солнечного излучения. К

таким веществам относятся любые вещества, которые воспламеняются при температуре больше 61°C , продолжая после этого самостоятельно гореть без внешнего инициирования, воздействия. К этим веществам относятся: нефть, газовый конденсат, различные виды топлива, смазок, масел, мазутов, дизельное топливо для электрогенераторов. Поэтому определение температурного состояния этих резервуаров чрезвычайно важно для предотвращения самовоспламенения хранимого продукта.

В последние годы большое внимание уделяется оценке влияния тепловых потоков на различные сооружения как на суше, так и на море [1, 5, 6, 8]. Это связано как с развитием солнечной энергетики [17, 18], так и с значительным числом аварий, связанных с перегревом конструкций от воздействия. Большое внимание в последние годы уделяется термодиагностике, ключевым требованием которой является определение температуры внешней стенке объекта и поиск температурных искажений в исследуемом объекте, которые сигнализируют о наличии дефектов [19, 20]. Раздел термодиагностики, фиксирующий естественный нагрев исследуемого здания или сооружения под воздействием солнечного излучения без применения иных активных источников нагрева, получил название «пассивный».

Целью настоящей статьи является:

1. провести сравнительный анализ результатов, полученных различными методами определения воздействия солнечного излучения на здания и сооружения на примере исследования элементов морских стационарных платформ;
2. определить величину концентрации напряжений при наличии трещин на исследуемых элементах морской платформы в условиях воздействия солнечного излучения;
3. определить, возможно ли самовоспламенение хранимых в резервуарах на морских платформах самовоспламеняющихся веществ при воздействии на них солнечного излучения.

Материалы, методы и результаты исследования. Как уже говорилось раньше, основным источником нагрева в условиях морского месторождения является солнечное излучение, которое в литературе также называется солнечной радиацией. Ранее автором была предложена следующая формула для оценки температуры элементов платформы при действии на них солнечного излучения [19, 20]. Рассмотрим данный метод более подробно.

Метод №1. Первым шагом в этом методе является определение так называемой скорректированной плотности теплового потока, которая рассчитывается по формуле:

$$Q_i^{cor} = Q_i - q, \quad (2)$$

где: Q_i^{cor} - скорректированная плотность теплового потока, Вт/м^2 ; Q_i - начальная плотность теплового потока, Вт/м^2 ; q - отводящая от поверхности металла стенки сооружения в окружающую среду плотность теплового потока, Вт/м^2 определяемая по формуле:

$$q = \gamma \alpha (t_{\text{wall}} - t_{-m}), \quad (3)$$

Где: γ – коэффициент учитывающий какая часть сооружения находится непосредственно под воздействием солнечного излучения; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(К·м²); t_{wall} – температура внешней стенки сооружения, С°; t_{-m} – температура окружающей среды, С°.

В свою очередь, коэффициент теплоотдачи α рассчитывается по формуле [19]:

$$\alpha = \alpha_l + \alpha_k, \quad (4)$$

где: α_l – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(К·м²); α_k – коэффициент теплоотдачи вынужденной или свободной конвекцией, Вт/(К·м²). Детально определение этих значений и все необходимые данные приведены в работе [20].

$$T_{i+1} = T_i + 0,74 \frac{\pi R l}{m c} (Q_{i+1}^{\text{cor}} - Q_i^{\text{cor}}) \Delta t \quad (5)$$

где T_i и T_{i+1} – начальная и рассматриваемая в некоторый момент времени температура поверхности исследуемого сооружения, находящегося под действием прямого солнечного излучения; R – внешний радиус сооружения, м; l – его длина, м; 0,74 – поправочный коэффициент, учитывающий степень черноты трубы; m – масса рассматриваемого участка, кг; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К°); Q_{i+1}^{cor} и Q_i^{cor} – начальная и конечная за рассматриваемых промежутков времени плотности теплового потока, Δt – рассматриваемый промежуток времени (продолжительность излучения), секунды;

Данная методика справедлива для любых объектов цилиндрической формы, в том числе и резервуаров.

Метод №2. В настоящей статье рассмотрим более упрощенный метод. Данный метод основан на решении уравнения теплового баланса (ТБ), установившегося между поверхностью металла стенки элемента платформы (или резервуара) и окружающей средой и имеет следующий вид:

$$Q_{\text{sol}} \cdot S \mu = h_c \cdot S \cdot (T_h - T_{\text{air}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_h^4 - T_{\text{air}}^4), \quad (6)$$

где:

Q_{sol} – плотность потока солнечного излучения, Вт/м²;

S – площадь поверхности, находящейся под действием прямого солнечного излучения, м²;

μ – альbedo или коэффициент отражения поверхности.

h_c – коэффициент конвективной передачи тепла, Вт·м²/К°;

T_h – температура стенки исследуемого элемента, К°;

T_{air} – температура воздуха (окружающей среды), К°;

ε – коэффициент конвективной передачи тепла;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5.6703 \cdot 10^{-8}$

Как известно, солнечная постоянная, обеспечивающая поступление на границу атмосферы Земли, составляет 1353 Вт/м². В процессе прохождения через атмосферу, и в зависимости от многих других факторов он обязательно уменьшится. В практических расчетах для условий Черного моря автором было получено значение в диапазоне от 800 Вт/м² до 1000

Вт/м², а в некоторых случаях при хорошей прозрачности атмосферы оно может достигать и 1137 Вт/м². Коэффициент конвекционной передачи тепла зависит от материала поверхности, вида конвекционной среды и других параметров. Для твердых тел, теряющих тепло при свободной конвекции воздуха коэффициент h_c меняется в диапазоне 5...25 Вт·м²/К°. Для поверхности стальных конструкций в воздушной среде коэффициент конвективной передачи тепла составит 7,9 Вт·м²/К°. Коэффициент конвекционной передачи многократно возрастает при движении конвективной среды. Примем следующие исходные данные и проведем расчет по методу теплового баланса (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты расчета по уравнению теплового баланса

Наименование	Расчетное значение
Плотность потока солнечного излучения Q_{sol} , Вт/м²	800
Площадь поверхности, находящейся под действием прямого солнечного излучения S , м²	800
Альbedo или коэффициент отражения поверхности, μ	0.7
Коэффициент конвективной передачи тепла h_c , Вт·м²/К°	7.9
Температура воздуха (окружающей среды) T_{air} , К°	32 С° (305.15К°)
Начальная температура стенки исследуемого элемента T_h , К°	52 С° (325.15К°)
Коэффициент конвективной передачи тепла, ε	0.84
Постоянная Стефана-Больцмана σ , Вт·м²·К⁻⁴	$5.6703 \cdot 10^{-8}$
Конечная температура стенки исследуемого элемента T_h , К°	68 С° (341.15К°)

При расчете по методу №1 установлено, что при тех же условиях температура не может быть выше 62 С°. Определим температурные напряжения, возникающие при таком перепаде температур обоими методами. Приведем некоторые свойства сталей, от которых зависят температурные напряжения (табл.3).

Таблица 3 – Характеристика сталей конструктивных элементов МСП

Сталь	Эксплуатационная температура МСП										$\alpha, 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$
	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	
	Модуль упругости E, ГПа(10 ⁴ Н/мм ²)										
Вст3сп5, Ст10, Cr20	20,6	20,5	20,4	20,3	20,2	20,1	20	19,9	19,8	19,7	11,5
09Г2С, 17Г1С	21,6	21,5	21,4	21,3	21,2	21,1	21	20,9	20,8	20,7	11,5

Расчет по формуле (1) по первому методу показывает что величина размаха температурных напряжений $\Delta \sigma$ равна 24 Мпа. В тоже время величина размаха температурных напряжений $\Delta \sigma$, рассчитанная по методу теплового баланса равна 38 Мпа.

Рассмотрим возможность самовоспламенения некоторых горючих веществ, которые могут храниться на платформе. В таблице 4 приведены некоторые показатели самовоспламенения некоторых веществ.

Таблица 4 – Температура вспышки некоторых веществ

Наименование продукта	Температура вспышки, С°
Бензин	280
Керосин	295
Природный газ	580
Метанол	385
Нефть	400
Промысловый газ	750
Пропан	480
Пары дизельного топлива	52

Таким образом расчеты показывают, что возникающие в результате солнечного воздействия температуры в резервуарах как правило недостаточны для самовоспламенения хранимых продуктов. Однако нельзя исключать случаи, при которых при нагревании образуются пары горючих веществ у которых температура вспышки намного ниже, чем у этих веществ в жидком состоянии. Поэтому при проектировании этих резервуаров необходимо проводить детальный расчет теплового состояния резервуаров и в случае необходимости применять дополнительные защитные меры от самовоспламенения паров горючих продуктов.

Вывод. В статье приводится сравнение методов оценки влияния плотности тепловых потоков от солнечного излучения на различные металлоконструкции, расположенные на морской стационарной платформе, и создаваемые в результате этого воздействия температуры. В результате автор приходит к выводу, что для метод, основанный на решение теплового баланса, подходит для первичной приблизительной оценки создаваемых температур. В применяемом методе ТБ не учитывается масса металлоконструкции, на нагрев которой распределяется поступающая от солнца энергия. Кроме того, в этом методе не учитывается вынужденная конвекция от ветровых потоков и иные факторы, которые могут значительно повлиять на тепловое состояние металлоконструкций. Отдельно следует сказать, что крайне важным фактором является оценка длительности воздействия теплового потока, что в методе ТБ не предусмотрено. Его применение возможно только в какой-то единичный момент времени. Поэтому для более точной оценки влияния солнечного излучения на тепловое состояние металлоконструкций морской стационарной платформы рекомендуется применение метода №1.

Безусловно, сами по себе температурные напряжения, рассчитанные по разным методам от 24 Мпа до 38 Мпа незначительно повлияют на прочность металлоконструкций платформы, однако при наличии опасных трещиноподобных дефектов возможно формирование локальных зон перенапряжения с значениями более 80 Мпа и выше, в зависимости от конкретного размеров конкретного дефекта.

Анализ данных в таблице 4 показал, что получаемые в результате солнечного воздействия температуры в резервуарах в большинстве случаев недостаточны для самовоспламенения хранимых продуктов. Однако при нагреве возможно образование их паров,

температура вспышки которых намного ниже, что может представлять опасность. Поэтому при проектировании этих резервуаров необходимо проводить детальный расчет теплового состояния резервуаров и в случае необходимости применять дополнительные защитные меры.

Предложенный в работе метод расчета позволит значительно уточнить результаты, полученные в ходе проведения комплексной технической диагностики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 N 116-ФЗ http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/
2. DNV-RP-C103. Рекомендованная практика. Расчет усталости морских стальных конструкций. – Norway: DNV, 2008. – 158 p.
3. DNVRP 2A-WSD «Рекомендуемая практика планирования, проектирования и сооружения морских стационарных платформ-расчет по допустимым напряжениям»- American Bureau of shipping, New York, 2005-132p
4. Правила Классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ-Российский морской регистр судоходства, СПб., 2014-484с.
5. Староконь И.В. Анализ зарубежных норм оценки рисков морских нефтегазовых сооружений на основе изучения нормативной документации// Естественные и технические науки. 2009. № 6 (44). С. 343-345.
6. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076-01 Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий, Минздрав России, Москва 2002 <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294846/4294846958.htm>
7. Селиванов Н.П., Мелуа А.И. Энергоактивные здания М.: Стройиздат, 1988. - 376 с.
8. Староконь И.В. Исследование влияния окружающей среды на тепловое состояние конструктивных элементов опорных блоков морских стационарных платформ// Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 194.
9. Перехоженцев А. Г. Влияние климатических воздействий на температурно-влажностное состояние поверхностных слоев многослойных наружных ограждающих конструкций зданий / а. Г. Перехоженцев, и. Ю. Груздо // международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 4 (46) Часть 2. — С. 143—149. — URL: <https://research-journal.org/technical/vliyanie-klimaticheskix-vozdeystviy-na-temperaturno-vlazhnostnoe-sostoyanie-poverkhnostnyx-sloev-mnogoslojnyx-naruzhnyx-ograzhdayushhix-konstrukcij-zdanij/> (дата обращения: 27.08.2020.). doi: 10.18454/IJR.2016.46.017
10. Рачкова О.Г. Влияние средств солнечной энергетики на архитектурное формообразование гелиоэнергоактивных зданий// Известия КГАСУ, 2015, № 2 (32)-с. 77-81
11. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учебник для вузов. Часть 1. Конструирование. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 555 с.
12. Макаров Г.И., Капустин О.Е. Экспериментальная оценка напряженно-деформированного состояния сварных трубопроводов с помощью электрических датчиков сопротивления и аналогово-цифровых преобразователей // Сварочное производство.-2018.-№11.-С. 3-14
13. Староконь И.В. Теоретические основы и практические результаты исследования напряженного состояния опорных блоков морских стационарных платформ// Фундаментальные исследования. 2014. № 12-5. С. 941-946.
14. Макаров Г.И., Капустин О.Е. Компьютерные методы расчета и проектирования сварных конструкций нефтегазового профиля с использованием метода конечных элементов // Сварочное производство.-2019.-№11.-С. 3-9
15. Староконь И.В. О результатах численно-аналитического моделирования воздействия переменных и условно стационарных температурных полей на развитие усталостных трещин морских нефтегазовых сооружений (МНГС)// Фунда-

ментальные исследования. 2013. № 1-1. С. 153-158.

16. Луканин В.Н., Шатров М.Г. Теплотехника : учебник для вузов. - М. : Высшая школа, 2000. – 671 с.

17. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. - Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 506 с.

18. Самойлов Д.В. Расчет величины поступления теплоты от солнечной радиации на поверхность Земли : методические указания / под ред. Ю.В. Пешти. - М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 20 с.

19. Староконь И.В. Методика оценки воздействия солнечного излучения на температурное состояние морских стационарных платформ // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=12713>

20. Староконь И.В. Научные основы процессов формирования тепловых полей и перспективы применения методов термодиагностики для оценки надежности эксплуатации морских нефтегазопромысловых сооружений.//Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2017. № 3. С. 70-76.

Статья поступила в редакцию 28.07.2020

Статья принята к публикации 14.09.2020