

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.463.32:656.085.5

doi: 10.30987/2782-5957-2024-1-44-52

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ ПРИ ПОЖАРЕ С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Дмитрий Вячеславович Зяблов¹, Сергей Валерьевич Беспалько^{2✉}

¹ ОАО «Российские железные дороги», Москва, Россия

² Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва, Россия

¹ zyaablov21@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8733-0337>

² besp-alco@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0901-6605>

Аннотация

Аварийные режимы, возникающие при воздействии открытого пламени на котел нефтебензиновой цистерны, приводят к температурным напряжениям, которые могут привести к ослаблению механических свойств материала, в том числе, жесткости и прочности. Рассматривается аварийный режим, связанный с воздействием на котел цистерны открытого пламени. Воздействие повышенных температур может вызвать разрушение котла, пролив продукта, его возгорание или взрыв. Само нарушение герметичности оболочки котла приводит к проливу продукта, который может поддерживать процесс горения, а также нанести ущерб экологии. Рассмотрена методика определения нагруженности котла цистерны в очаге пламени, с учетом геометрической нелинейности. Предложенная методика была представлена в виде программы на РТС Mathcad и позволяет на стадии разработки железнодорожных создавать системы защиты от пожара.

Цель данного исследования состоит в определении нагруженности котла цистерны при пожаре с учетом геометрической нелинейности и реализации разработанной методики моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки котла нефтебензиновой цистерны при пожаре. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать расчетную схему оболочки;

- рассмотреть и учесть все допущения, при которых будет строиться расчет;
- разработать математическую модель на основе нелинейной теории оболочек;
- применить для расчета вариационный метод в виде принципа Лагранжа, составив выражением для потенциальной энергии;
- провести имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния котла цистерны от воздействия неравномерного температурного поля при пожаре;
- оценить влияние учета геометрической нелинейности на деформированное состояние оболочки.

В результате выполненного исследования:

- разработана методика моделирования напряженно-деформированного состояния котла цистерны при воздействии открытого пламени с учетом геометрической нелинейности;
- определено НДС оболочки при пожаре в программе РТС Mathcad;
- приведены максимальные перемещения оболочки котла цистерны от перепада температур в очаге пожара с учетом геометрической нелинейности и без нее.

Ключевые слова: котел, цистерна, пламя, режим, методика, температура, напряжение, ряд Тейлора, принцип Лагранжа.

Ссылка для цитирования:

Зяблов Д.В. Определение нагруженности котла цистерны при пожаре с учетом геометрической нелинейности / Д.В. Зяблов, С.В. Беспалько // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 1. – С.44-52. doi: 10.30987/2782-5957-2024-1-44-52.

Original article

Open Access Article

DETERMINATION OF THE TANK BOILER LOADING CAPACITY IN CASE OF FIRE, TAKING INTO ACCOUNT GEOMETRIC NONLINEARITY

Dmitry Vyacheslavovich Zyaablov¹, Sergey Valeryevich Bepalko^{2✉}

¹ JSC «Russian Railways», Moscow, Russia

² Russian University of Transport (RUT (МИИТ)), Moscow, Russia

¹ zyaablov21@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8733-0337>

² besp-alco@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0901-6605>

Abstract

Emergency conditions caused by the open flame on the oil tanker lead to temperature stresses, which can result in weakening of the mechanical properties of the material, including rigidity and strength. The emergency state associated with the impact of the open flame on the tank boiler is considered. Exposure to elevated temperatures can cause the boiler damage, product spill, its ignition or exposure. The seal failure of the boiler shell leads to the product spill that can support the ignition process, as well as damage the environment. A technique to determine the loading capacity of a tank boiler in a flame hearth, taking into account geometric nonlinearity, is considered. The proposed technique is presented as PTC Mathcad program and allows to make fire protection systems during design stage.

The study objective is to determine the loading capacity of a tank boiler in case of fire, taking into account geometric nonlinearity and the implementation of the developed technique for modeling SSS tank boiler shell in case of fire.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- the design diagram of the shell is developed;

Reference for citing:

Zyablov DV, Bespalko SV. Determination of the tank boiler loading capacity in case of fire, taking into account geometric nonlinearity *Transport Engineering*. 2024;1:44-52. doi: 10.30987/2782-5957-2024-1-44-52.

Введение

При воздействии пожара на цистерны для пожаро- и взрывоопасных грузов [1, 2] возможны тяжелые последствия в виде значительного нагрева, что с точки зрения напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки выражается в следующем [3]:

- возникают высокие температурные напряжения и деформации оболочки, что может привести к разрушению котла;
- возникает геометрическая нелинейность из-за значительных деформаций, что необходимо учитывать при определении НДС;
- возникает физическая нелинейность НДС из-за ослабления механических

Расчётная схема и принятые допущения

Расчёт строится при следующих допущениях:

- all the assumptions needed for the calculation are considered and taken into account;
- a mathematical model based on the nonlinear theory of shells is developed;
- Lagrangian field theory is applied to make an expression for potential energy;
- stress-strain state of the tank boiler caused by uneven temperature field in case of fire is simulated;
- the effect of geometric nonlinearity on the deformed state of the shell is evaluated.

A technique is developed to simulate the stress-strain state of a tank boiler under the influence of an open flame, taking into account geometric nonlinearity.

Using the developed technique, SSS of the shell in case of fire is determined by means of PTC Mathcad program;

The maximum displacements of the tank boiler shell caused by the temperature difference in the fire source are given, taking into account geometric nonlinearity and without it.

Keywords: boiler, tank, flame, mode, technique, temperature, voltage, Taylor series, Lagrangian field theory.

свойств металла, что также способствует возможному разрушению котла;

- имеет место нагрев и повышение давления перевозимого продукта, что создает дополнительные нагрузки на оболочку.

В настоящей работе рассматривается напряженно-деформированное состояние (НДС) котла железнодорожной цистерны от локального повышения температуры при пожаре с учетом геометрической нелинейности (пп. а, б).

На рис. 1 показаны последствия нахождения цистерн в очаге пожара.

1. Рассматривается цилиндрическая зона, симметричная относительно очага пожара.

2. Оболочка полагается гладкой, без учета горловины, опор и других нерегулярностей.

3. Температурное поле принимается одинаковой повышенной температурой в пределах зоны с координатами $0 \leq x \leq p$; $0 \leq y \leq s$.

4. Вне данной зоны температура равна температуре окружающей среды.

5. По толщине оболочки перепад температур не учитывается.

6. Применен вариационный метод в виде принципа Лагранжа.

7. Моделирование воздействий температурного поля и внутреннего давления производится независимо друг от друга.

Расчётная схема оболочки котла цистерны приведена на рис. 2. Она имеет цилиндрическую систему координат $Oxyz$ с началом O в центре очага пламени. Ось Ox направлена вдоль оси котла; ось Oy – в окружном направлении; ось Oz – в радиальном направлении. a, b – размеры исследуемой зоны оболочки; R – радиус средней поверхности; h – толщина; p, s – размеры зоны повышенной температуры; u, v, w – перемещения вдоль осей Ox, Oy и Oz , соответственно.

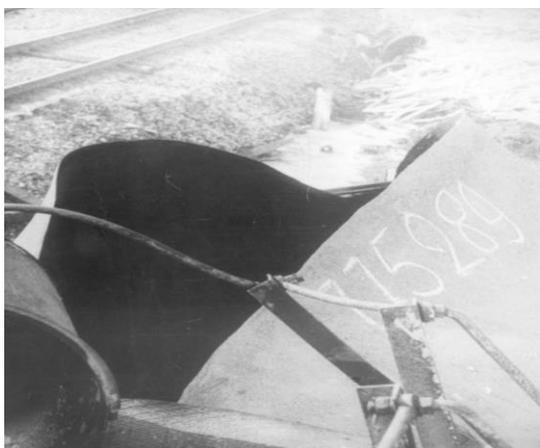


Рис. 1. Последствия нахождения котла цистерны в очаге пожара
Fig. 1. Consequences of the tank boiler being in the fire

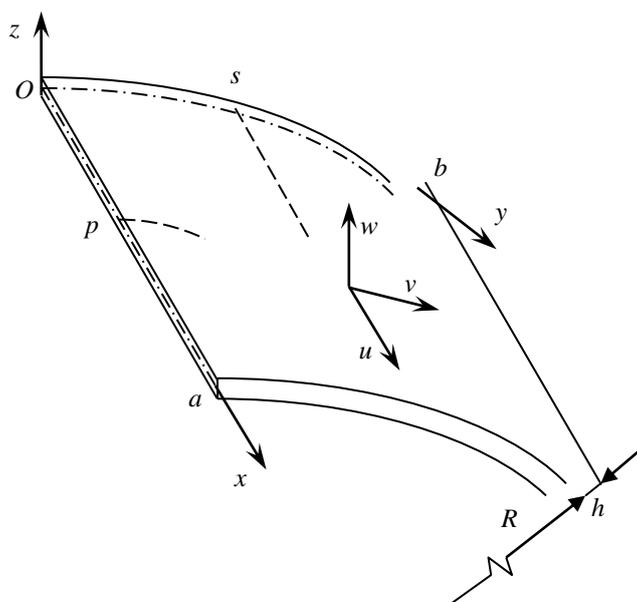


Рис. 2. Расчетная схема
Fig. 2. Scheme of calculation

Методика определения НДС котла в очаге пожара с учётом геометрической нелинейности

При нагреве оболочки под действием открытого пламени прогибы оболочки могут достигать значительных величин, и проявляется геометрическая нелинейность деформаций. Разработаем математическую модель на основе нелинейной теории оболочек [4].

Отличие данного подхода состоит в том, что по сравнению с линейной теорией оболочек [5] деформации растяжения-сжатия и сдвига приобретают нелинейные члены в виде квадратичных зависимостей от углов поворота срединной поверхности оболочки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \varepsilon_T; \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon_T; \\ \omega = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y}; \kappa_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \kappa_T; \\ \kappa_2 = \frac{\partial v}{R \partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \kappa_T; \quad \tau = \frac{\partial v}{R \partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – мембранные деформации вдоль осей Ox и Oy ; ω – сдвиговая деформация; κ_1, κ_2 – деформации изменения кривизны оболочки в продольной и поперечной плоскостях котла; τ – деформация кручения; $\varepsilon_T = \alpha_T \Delta T$ – чисто тепловая мембранная деформация; α_T – коэффициент

линейного расширения; ΔT – изменение температуры; $\kappa_T = 0$ – чисто тепловая деформация изменения кривизны [6].

Соотношения (1) удобно представить в следующей форме, рассматривая отдельно линейные и нелинейные части деформаций:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \varepsilon_{1l} + \varepsilon_{1н}; \varepsilon_2 = \varepsilon_{2l} + \varepsilon_{2н}; \omega = \omega_l + \omega_n; \\ \kappa_1 = \kappa_{1l}; \quad \kappa_2 = \kappa_{2l}; \quad \tau = \tau_l, \end{array} \right. \quad (2)$$

где индексами «л» и «н» обозначены, соответственно, линейные и нелинейные части деформаций;

$$\varepsilon_{1н} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2; \varepsilon_{2н} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2; \omega_n = \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y}. \quad (3)$$

Физические соотношения таковы:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 = B(\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \quad N_2 = B(\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1); \quad S = B_c \omega; \\ M_1 = D(\kappa_1 + \mu \kappa_2); \quad M_2 = D(\kappa_2 + \mu \kappa_1); \quad H = 2D_c \tau, \end{array} \right. \quad (4)$$

где N_1, N_2 – мембранные усилия вдоль осей Ox и Oy ; S – сдвигающая внутренняя сила; M_1, M_2 – изгибающие моменты в продольной и поперечной плоскостях; H – внутренние крутящие моменты; $B = \frac{Eh}{1-\mu^2}$;

– цилиндрические жесткости оболочки [5]; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Для расчета применим вариационный метод в виде принципа Лагранжа [7] составим выражением для потенциальной энергии:

$$B_c = \frac{Eh}{2(1+\mu)}; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}; \quad D_c = \frac{Eh^3}{12(1+\mu)}$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b (\varepsilon_1 N_1 + \varepsilon_2 N_2 + \omega S + \kappa_1 M_1 + \kappa_2 M_2 + \tau H) dy dx. \quad (5)$$

Представим перемещения оболочки в виде полиномов Эрмита [3, 8]:

$$\begin{cases} u = \frac{x}{a} \cdot \frac{y}{b} u_0; \\ v = \left(1 - \frac{x}{a}\right) \frac{y}{b} v_0; \\ w = \left(\frac{2x^3}{a^3} - \frac{3x^2}{a^2} + 1\right) \left(\frac{2y^3}{b^3} - \frac{3y^2}{b^2} + 1\right) w_0; \end{cases} \quad (6)$$

изменение температуры зададим одинаковым в пределах очага пламени:

$$\Delta T = \begin{cases} T_u \text{ при } \begin{cases} 0 \leq x \leq p; \\ 0 \leq y \leq s; \end{cases} \\ 0 \text{ при } \begin{cases} x > p; \\ y > s, \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

где индексом 0 обозначены максимальные значения соответствующих перемещений (далее называемые узловыми).

С учетом (6) и (7) деформации растяжения-сжатия и сдвига приобретают квадратичные члены относительно w_0 .

В работе [9] аналогичный подход привел к системе кубических уравнений

$$\begin{aligned} f(w_0) \approx & f(\tilde{w}_0) + f'(\tilde{w}_0)(w_0 - \tilde{w}_0) + \\ & + \frac{f''(\tilde{w}_0)}{2!}(w_0 - \tilde{w}_0)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(\tilde{w}_0)}{n!}(w_0 - \tilde{w}_0)^n, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\tilde{w}_0 = \text{const}$ - приближение для значения переменной w_0 ; n - номер члена ряда.

В качестве \tilde{w}_0 можно принять значение узлового перемещения, полученное с применением линейной теории [5, 3].

относительно радиального перемещения, что усложняет процесс нахождения корней. В настоящей работе проведем линеаризацию деформаций, применив разложение в ряд Тейлора [10, 11].

Формула Тейлора для нелинейной функции f относительно перемещения w_0 имеет вид:

Из членов ряда (8) в расчете удержим первые два, что приводит к следующей линейной зависимости:

$$w_0^2 \approx 2\tilde{w}_0 w_0 - \tilde{w}_0^2. \quad (9)$$

С учетом выражения (9) нелинейные составляющие деформаций выразятся следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1n} &= \frac{1}{2} \left(\frac{6x^2}{a^3} - \frac{6x}{a^2} \right)^2 \left(\frac{2y^3}{b^3} - \frac{3y^2}{b^2} + 1 \right)^2 (2\tilde{w}_0 w_0 - \tilde{w}_0^2); \\ \varepsilon_{2n} &= \frac{1}{2} \left(\frac{6y^2}{b^3} - \frac{6y}{b^2} \right)^2 \left(\frac{2x^3}{a^3} - \frac{3x^2}{a^2} + 1 \right)^2 (2\tilde{w}_0 w_0 - \tilde{w}_0^2); \\ \omega_n &= \frac{1}{2} \left(\frac{6x^2}{a^3} - \frac{6x}{a^2} \right) \left(\frac{2x^3}{a^3} - \frac{3x^2}{a^2} + 1 \right) \left(\frac{6y^2}{b^3} - \frac{6y}{b^2} \right) \left(\frac{2y^3}{b^3} - \frac{3y^2}{b^2} + 1 \right) (2\tilde{w}_0 w_0 - \tilde{w}_0^2). \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, в результате линеаризации потенциальная энергия деформации будет включать зависимости от узловых

перемещений в степени не выше второй, а после минимизации энергии [7]

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial u_0} = 0; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial v_0} = 0; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial w_0} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

– не выше первой, причем члены, содержащие узловые перемещения приведут к матрице жесткости следующего вида:

$$[r] = \begin{bmatrix} \frac{Bb}{3a} + \frac{B_c a}{3b} & \frac{B\mu}{4} - \frac{B_c}{2} & \frac{3B\mu b}{40R} + \frac{\tilde{w}_0}{175} \left[\frac{18Bb}{a^2} + \frac{13(3B\mu + 5B_c)}{b} \right] \\ \frac{B\mu}{4} - \frac{B_c}{2} & \frac{Ba}{3b} + \frac{B_c b}{3a} + \frac{2D_c b}{3R^2 a} + \frac{Da}{3R^2 b} & \frac{7Ba}{40R} + \frac{D\mu + 2D_c}{2Ra} + \frac{\tilde{w}_0}{350} \left[\frac{78B\mu}{a} + \frac{120Ba}{b^2} - \frac{65B_c}{a} \right] \\ \frac{3B\mu b}{40R} + \frac{\tilde{w}_0}{175} \left[\frac{18Bb}{a^2} + \frac{13(3B\mu + 5B_c)}{b} \right] & \frac{7Ba}{40R} + \frac{D\mu + 2D_c}{2Ra} + \frac{\tilde{w}_0}{350} \left[\frac{78B\mu}{a} + \frac{120Ba}{b^2} - \frac{65B_c}{a} \right] & \frac{169Bab}{1225R^2} + \frac{13752B\tilde{w}_0^2}{25025} \left(\frac{b}{a^3} + \frac{a}{b^3} \right) + \frac{72(D\mu + D_c)}{25ab} + \frac{129B\tilde{w}_0}{350R} \left(\frac{\mu b}{a} + \frac{a}{b} \right) + \frac{156D}{35} \left(\frac{b}{a^3} + \frac{a}{b^3} \right) + \frac{1682(2B_c + B\mu)\tilde{w}_0^2}{5929ab} \end{bmatrix}$$

Члены, не содержащие узловых перемещений составят правой части системы уравнений, который будем называть вектором тепловых воздействий:

$$\vec{p}_T = \alpha_T B T_u p s (1 + \mu) \begin{bmatrix} \frac{s}{ab} \\ \frac{p + 2a}{ab} \\ \frac{2}{R} \left(\frac{p^3}{2a^3} - \frac{p^2}{a^2} + 1 \right) \left(\frac{s^3}{2b^3} - \frac{s^2}{b^2} + 1 \right) \end{bmatrix}$$

Сформированная таким образом система уравнений в матричной форме имеет вид:

$$[r] \vec{u}_0 = \vec{p}_T, \quad (12)$$

где $\vec{u}_0 = \{u_0; v_0; w_0\}$ - вектор узловых перемещений, который вычисляется следующим образом:

$$\vec{u}_0 = [r]^{-1} \vec{p}_T. \quad (13)$$

После определения всех параметров НДС по (6), (1), (4) вычисляются напряжения в оболочке (14):

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \frac{N_1}{h} \pm \frac{6M_1}{h^2}; \\ \sigma_{22} = \frac{N_2}{h} \pm \frac{6M_2}{h^2}; \\ \sigma_{21} = \sigma_{12}^{H,B} = \frac{S}{h} \pm \frac{6H}{h^2}. \end{cases} \quad (14)$$

Реализация методик и результаты расчётов

Предложенная методика была представлена в виде программы на РТС Mathcad. На ее основе произведено имита-

ционное моделирование со следующими исходными данными (табл. 1).

Общая форма деформации оболочки в очаге пламени приведена на рис. 3. Из диаграммы видно, что максимальный прогиб имеет место в центре очага пожара.

В табл. 2 приведены максимальные перемещения оболочки с учетом и без учета геометрической нелинейности.

Из приведённых результатов видно, что геометрическая нелинейность НДС приводит к существенному увеличению деформаций оболочки котла в очаге пожара, что необходимо учитывать при определении НДС.

Таблица 1
Исходные данные
при определении НДС в очаге пожара

Table 1

*Initial data
for determining SSS in the seat of fire*

R	3050 мм
h	10 мм
материал	Сталь 09Г2С
E	$2,1 \cdot 10^5$ МПа
μ	0,3
a	2000 мм
b	2400 мм
p	900 мм
s	1178 мм
$T_{ц}$	750 °С
$\alpha_{т}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$ К ⁻¹

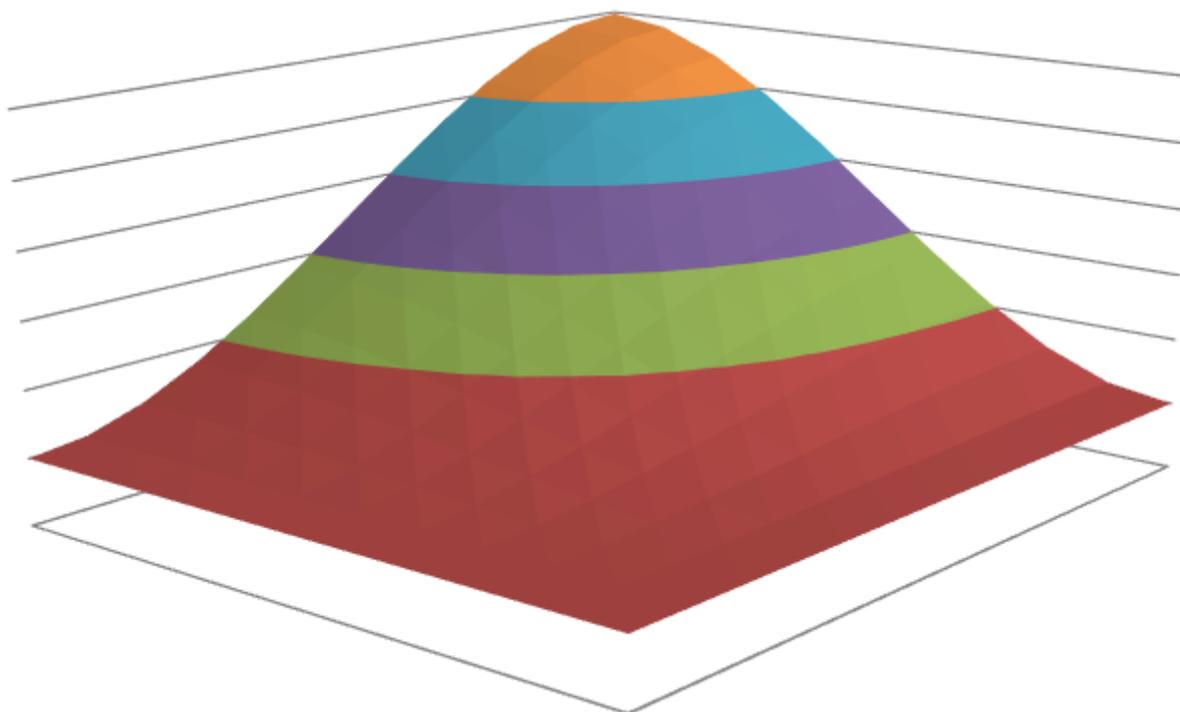


Рис. 3. Деформированное состояние оболочки котла цистерны в очаге пламени

Fig. 3. The stress-strain state of a shell of tank boiler in a fire

Таблица 2
Максимальные перемещения оболочки от перепада температур в очаге пожара

Table 2

Maximum displacement of the shell caused by the temperature difference in the seat of fire

Перемещение, мм	Линейная теория оболочек	Нелинейная теория оболочек	Расхождение, %
Продольное u_0	1,81	2,24	23,8 %
Тангенциальное v_0	-2,34	-0,41	-82,5 %
Радиальное w_0	49,77	74,01	48,7 %

Выводы

Разработана математическая модель для определения напряженно-деформированного состояния оболочки котла цистерны при пожаре с учётом геометрической нелинейности.

Применена нелинейная теория оболочек, полиномы Эрмита и принцип Лагранжа.

Расчетные зависимости получены в явном виде, что делает методику эффективной при реализации на ЭВМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филиппов, В.Н. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом [Текст] / В.Н. Филиппов, А.П. Шевчук [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – № 6. – С. 35 - 39.
2. Шебеко, Ю.Н. Экспериментальное исследование поведения тонкостенных оболочек в очаге пламени [Текст] / Ю.Н. Шебеко, В.А. Назаренко, В.Н. Филиппов [и др.] // Пожарная безопасность. – 2004. – № 2. – С. 64 - 71.
3. Беспалько С.В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07. - М., 2000. – 47 с.
4. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1972. - 432 стр.
5. Филин А.П. Элементы теории оболочек. - Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. - 384 с.
6. Огибалов П.М., Грибанов В.Ф. Термоустойчивость пластин и оболочек. - М.: МГУ, 1968. - 518 с.

REFERENCES

1. Filippov VN, Shevchuk AP. Fire and explosion safety of transporting liquefied hydrocarbon gases by rail. *Fire and Explosion Safety*. 1993;6:35-39.
2. Shebeko YuN, Nazarenko VA, Filippov VN. Experimental study of the behavior of thin-walled shells in a flame. *Fire and Explosion Safety*. 2004;2:64-71.
3. Bespalko SV. Development and analysis of models of damaging effects on tank boilers for transporting cryogenic products [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; 2000.
4. Volmir AS. Nonlinear dynamics of plates and shells. Moscow: Nauka; 1972.
5. Filin AP. Elements of shell theory. Leningrad: Stroyizdat; 1987.
6. Ogibalov PM, Griбанov VF. Thermal stability of plates and shells. Moscow: Moscow State University; 1968.

Выполнено имитационное моделирование состояния котла нефтебензиновой цистерны при пожаре. Оценено влияние учета геометрической нелинейности на деформированное состояние оболочки. Максимальный прогиб в центре очага возрастает на 49 %.

Разработанная методика может применяться при создании средств защиты котлов цистерн от воздействия открытого пламени.

7. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Ч. 2. – Л.–М.: ОГИЗ, 1942. – 580 с.
8. Головин, В.В. Моделирование поведения котла цистерны в очаге пламени [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Головин Виталий Владимирович. – М., 2005. – 22 с.
9. Маслов, И.Г. Состояние котла цистерны при воздействии очага пламени в аварийной ситуации : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.07 / Маслов Илья Геннадьевич; [Место защиты: Моск. гос. ун-т путей сообщ. Императора Николая II]. - Москва, 2016. - 132 с. : ил.
10. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Том 1. – СПб: «БХВ-Петербург», 2008. – 624 с.
11. Михлин С. Г. Курс математической физики. Москва : Наука, 1968. 576 с.
12. Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст]: справочник / В.Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

7. Loitsyansky LG, Lurie AI. Course of theoretical mechanics. Leningrad–Moscow: OGIZ; 1942.
8. Golovin, VV. Modeling the behavior of a tank boiler in a flame [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; 2005.
9. Maslov IG. The condition of the tank boiler under the influence of a flame source in an emergency situation [dissertation]. [Moscow (RF)]: Moscow State University of Railway Engineering; 2016.
10. Smirnov VI. Course of higher mathematics. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2008.
11. Mikhlin SG. Course of mathematical physics. Moscow: Nauka; 1968.
12. Zinoviev VE. Thermophysical properties of metals at high temperatures: handbook. Moscow: Metallurgiya; 1989.

Информация об авторах:

Зяблов Дмитрий Вячеславович – аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва, Россия, тел. +7(926)761-61-47.

Zyablov Dmitry Vyacheslavovich – Postgraduate Student of the Department of Cars and Car Facilities at the Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russia; phone: +7(926)761-61-47.

Беспалько Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва, Россия, тел. +7(905)585-85-36.

Bespalko Sergey Valeryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cars and Car Facilities at the Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russia; phone: +7(905)585-85-36.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена после рецензирования 27.11.2023; принята к публикации 27.12.2023. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 28.11.2023; approved after review on 27.11.2023; accepted for publication on 27.12.2023. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.