

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.463.32

doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-66-76

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КОТЛА ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Артем Юрьевич Сурнин^{1✉}, Сергей Валерьевич Беспалько²

^{1,2} Российский университет транспорт, Москва, Россия

¹ mister.surnin@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5532-5445>

² besp-alco@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6027-6039>

Аннотация

Цель исследования заключается в том, чтобы определить влияние остаточных деформаций на поведение котла при эксплуатации.

Задачи: разработать модель ползучести по теории течения и методику расчета деформаций ползучести котла железнодорожной цистерны, возникающих при длительной эксплуатации. Используются методы теории упругости и ползучести, метод конечных элементов.

Новизна работы заключается в разработке методики определения остаточных деформаций в котле вагона-цистерны. Результатами исследования являются зависимости величины остаточных де-

формаций от различных факторов, деформации котла в зонах опор, выборка параметров модели ползучести.

Выводы: в исследовании было смоделировано уравнение состояния ползучести, на основе которого проведены расчеты различных вариантов технических решений по уменьшению остаточных деформаций в котле. Проведено сравнение вариантов.

Ключевые слова: котел, цистерна, метод, элементы, ползучесть, состояние, теория, течение, деформация.

Ссылка для цитирования:

Сурнин А.Ю. Моделирование остаточных деформаций котла вагона-цистерны на основе теории ползучести / А.Ю. Сурнин, С.В. Беспалько // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 07. – С. 66-76. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-66-76.

Original article

Open Access Article

MODELING OF RESIDUAL DEFORMATIONS OF A TANK CAR BOILER BASED ON CREEP THEORY

Artem Yuryevich Surnin^{1✉}, Sergey Valeryevich Bepalko²

^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ mister.surnin@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5532-5445>

² besp-alco@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6027-6039>

Abstract

The study objective is to determine the effect of residual deformations on the behavior of the boiler during operation.

Tasks: to develop a creep model based on flow theory and a methodology for calculating creep deformations of a railway tank boiler that occur during long-term operation. The methods of elasticity and creep theory, finite element method are used.

The novelty of the work is in the development of a methodology for determining residual deformations in the boiler of a tank car. The results of the

study are the dependences of the value of residual deformations on various factors, the deformation of the boiler in the support zones, the selection of parameters of the creep model.

Conclusions: in the study, the creep state equation is modeled, on which basis calculations of various technical solutions for reducing residual deformations in the boiler are carried out. The options are compared.

Keywords: boiler, tank, method, elements, creep, state, theory, flow, deformation.

Reference for citing:

Surnin AYu, Bespalko SV. Modeling of residual deformations of a tank car boiler based on creep theory. *Transport Engineering*. 2023; 7: 66-76. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-66-76.

Введение

Перевозка грузов по железным дорогам занимает важное место в общем объеме грузооборота. Это связано в первую очередь с высокой экономической эффективностью железнодорожных цистерн. Для грузовых вагонов важным показателем является суточная доходность, зависящая от эффективности слива груза [1, 2]. Из-за длительного воздействия постоянной нагрузки от перевозимого груза в металле возникает и развивается явление ползучести. В процессе эксплуатации в нижней зоне котла накапливаются остаточные деформации, что приводит к образованию карманов (рис.1), которые препятствуют

полной разгрузке цистерны. Кроме того, растущая интенсивность использования вагонов, сокращение времени погрузки и разгрузки увеличивают интенсивность накопления деформаций, уменьшая срок службы котла [3, 4].

Чтобы уменьшить влияния остаточных деформаций на работу котла цистерны, необходимо рассмотреть поведение котла при длительном воздействии постоянных нагрузок с учетом явления ползучести. Также следует подобрать технические решения по улучшению прочностных свойств котла.

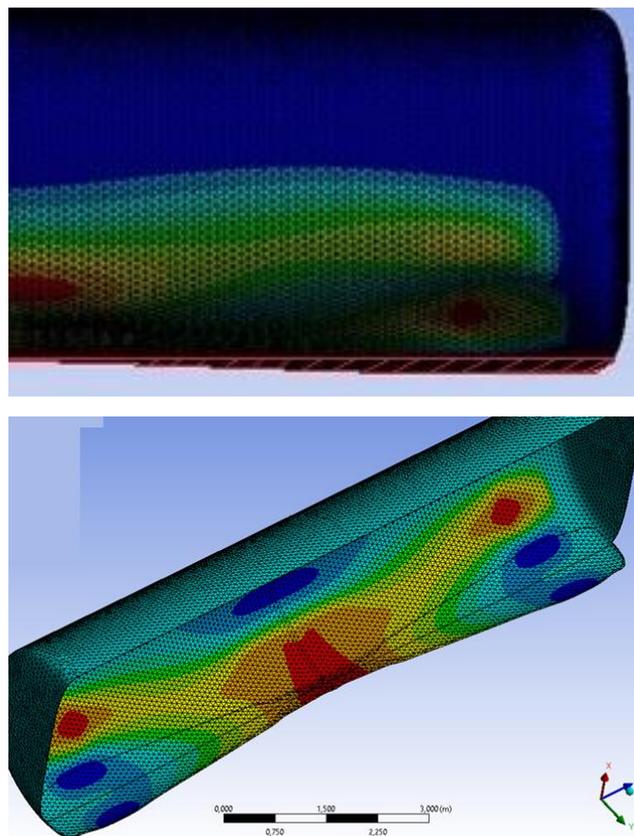


Рис. 1. Карманы, образующиеся из-за необратимых деформаций
Fig.1. Bags formed due to irreversible deformation

Методы

Формирование математической модели котла осуществляется на основе теории ползучести [5-7] и метода конечных элементов (МКЭ) [8-13].

Напряженно-деформированное состояние (НДС) котла опишем следующей системой уравнений [5, 14, 15]:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0, \\
\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0, \\
\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0, \\
\varepsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial u_y}{\partial y}, \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \\
\gamma_{yz} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \\
\gamma_{zx} &= \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}, \\
\sigma_x &= 2G\varepsilon_x + \lambda e, \\
\sigma_y &= 2G\varepsilon_y + \lambda e, \\
\sigma_z &= 2G\varepsilon_z + \lambda e, \\
\tau_{xy} &= G\gamma_{xy}, \\
\tau_{yz} &= G\gamma_{yz}, \\
\tau_{zx} &= G\gamma_{zx}.
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ – компоненты тензора напряжений; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yx}, \gamma_{xz}, \gamma_{zx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zy}$ – компоненты тензора деформаций; X, Y, Z – проекции объемных сил на оси координат x, y, z ; E – модуль упругости первого рода; ν – коэффициент Пуассона; G – модуль

упругости второго рода; e – объемная деформация; λ – коэффициент Ляме.

Для описания явления ползучести материала примем теорию течения. Уравнение поверхности потенциала ползучести будет иметь вид:

$$f = \frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} - [F(\xi_i^c, t)]^2 = 0, \quad (2)$$

где: S_{ij} – компоненты девиатора напряжений; ξ_i^c – интенсивность скорости деформации ползучести; t – время.

Зависимость компонентов тензора скоростей деформаций ползучести от компонентов девиатора напряжений имеет вид:

$$\dot{\xi}_{ij}^c = \frac{3}{2} \frac{\xi_i^c}{\sigma_i} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0), \quad (3)$$

где: σ_i – интенсивность напряжения; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; δ_{ij} – параметр Кронекера.

Учтем в (2) следующее выражение:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}}. \quad (4)$$

В итоге получим:

$$\sigma_i = F(\xi_i^c, t). \quad (5)$$

Формулы (3) и (5) характеризуют явление ползучести по теории течения.

Рассмотрим метод конечных элементов, суть которого заключается в том, что непрерывная величина (скалярная функция или вектор) разбивается на совокупность кусочно-непрерывных функций.

Запишем полную потенциальную энергию системы:

$$\Pi(v) = U(v) - W(v), \quad (6)$$

где: U – потенциальная энергия деформаций; W – работа внешних нагрузок; v – возможные перемещения.

Для решения уравнения (6) его необходимо минимизировать на множестве функций v . Функция, которая дает минимум, является искомой функцией перемещения, обозначим ее w . Для вычисления функции w введем пробные функции (метод Релея-Ритца):

$$v = B_1, v = B_2, \dots, v = B_n, \quad (7)$$

где n – размерность дискретной системы.

Далее определяется комбинация, минимизирующая уравнение (6) по пространству функций B :

$$w = \sum_{i=1}^n u_i B_i, \quad (8)$$

$$U = \frac{1}{2} \int \varepsilon \sigma dV = \frac{1}{2} \int \sum_i u_i L B_i \sum_j u_j S B_j. \quad (10)$$

Индекс j изменяется в тех же пределах, что индекс i .

Обозначим:

$$K_{ij} = \int (L B_i)(S B_j). \quad (11)$$

$$[u]^T = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}. \quad (12)$$

Учитывая (11) и (12), запишем (10) в следующем виде:

$$U = \frac{1}{2} [u]^T [K] [u]. \quad (13)$$

Работа внешних сил имеет вид:

$$W = \int p \sum_i u_i B_i, \quad (14)$$

где p – вектор, включающий в себя объемные, поверхностные и сосредоточенные силы.

Расчетная схема и допущения

Расчетная схема, изображенная на рис. 2, представляет собой конечно-элементную модель котла цистерны с лежащими и лапами. При формировании конечно-элементной сетки использовались тетраэдральные конечные элементы.

Опора котла на лапы и лежни смоделирована контактными конечными элементами типа «поверхность-поверхность» [16]. В качестве исходных данных принимались: изотропный материал, свойства которого соответствуют физическим ха-

где u_i – узловые значения функции w (параметры Ритца).

Условие минимума функционала Π запишем в виде системы уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial u_i} \Pi(w) = 0, \quad (9)$$

где $i = 1, \dots, n$.

Для вычисления энергии деформации U в (6) необходимо отыскать интеграл произведения функций напряжения и деформации. Для этого введем оператор дифференцирования L , переводящий перемещения в деформации, и оператор S , в котором к оператору L добавлена матрица Гука:

Обозначим:

$$P_i = \int p B_i. \quad (15)$$

Тогда (14) примет вид:

$$W = [u]^T [P], \quad (16)$$

где: $[P]^T = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$.

Учитывая (13) и (16) в (6) и применяя условие (9), получим:

$$[K][u] = [P], \quad (17)$$

где: $[K]$ – матрица жесткости конструкции; $[u]$ – вектор перемещений; $[P]$ – вектор нагрузки.

Система уравнений (17) является разрешающей. Расчет проведен в программном комплексе ANSYS.

характеристикам стали марки 17ГС, уровень заполнения котла принимался равным 97 %, температура конструкции не превышала 100 °С.

Силовая схема смоделирована распределенными на опоры силами, соответствующими реакциям опор на гидростатическую нагрузку, возникающую при наливке груза [17]. Вычисление реакций проведен отдельным расчетом (рис. 3). На рисунке конечные элементы имеют цвет, соответствующий величине реакции.

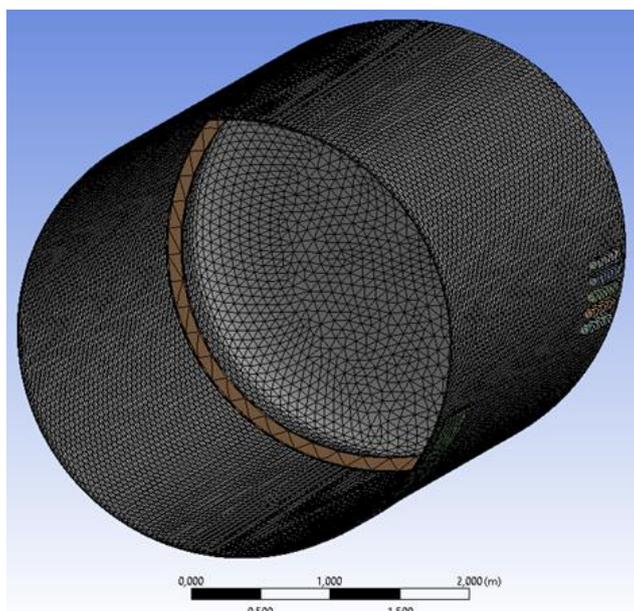


Рис. 2. Расчетная схема
Fig.2 The design model

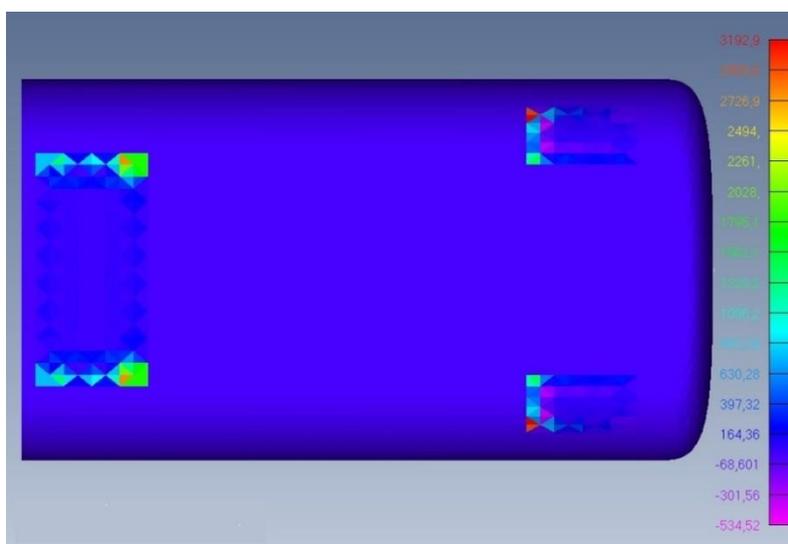


Рис. 3. Реакция опор на вес груза
Fig.3. The reaction of the supports to the mass of the goods

В табл. 1 приведены величины сил, приходящихся на опоры.

Таблица 1

Суммарные реакции опор

Table 1

Total reactions of supports

| Тип опоры | Суммарные реакции опор, Н |
|-------------------|---------------------------|
| Центральные опоры | 186046,02 |
| Лежневые опоры | 412509,48 |

Сформируем уравнение состояния ползучести согласно (3) и (5):

$$\xi^c = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3}, \quad (18)$$

где C_1, C_2, C_3 – постоянные ползучести (для сталей $C_1 > 0$, $C_2 > 1$, $\frac{1}{2} < C_3 \leq 1$).

C_1, C_2, C_3 найдем, используя справочные данные [18]:

$$\xi^c = 2.4713 \cdot 10^{-30} \sigma^{3.2467} t^{0.5}. \quad (19)$$

В исследовании рассмотрены следующие технические решения:

– монтаж броневых листов в зонах опор котла;

– усиление котла внутренними или внешними разрезными шпангоутами;
– усиление котла внутренними тягами;
– увеличение толщины листов котла.

Результаты

Предложена методика определения остаточных деформаций в котле цистерны, учитывающая явление ползучести материала. На основе методики проведен анализ зависимостей остаточных деформаций от различных факторов. Сравнение результатов проведено относительно базового расчета с толщиной листа котла 1 см без усиления шпангоутами, тягами и броневым листом.

На рис. 4, 5 изображены поля деформаций различных расчетных вариантов. Теплые оттенки цвета показывают деформации со знаком «+» относительно вертикальной оси, вектор деформаций направлен внутрь котла. Холодные оттенки показывают деформации со знаком «-» относительно вертикальной оси, вектор направлен наружу. Учитывая особенности силовой схемы, деформация в центральной зоне котла является величиной, на которую опускается котел относительно плоскости сливного прибора. В табл. 2 приведены данные о величинах деформаций и глубине кармана для рассматриваемых вариантов.

На рис. 6 и 7 приведены зависимости глубины кармана от толщины листа и толщины броневых листов, соответственно. По графикам видно ожидаемое уменьшение деформаций и глубины кармана за счет возрастания жесткости конструкции при увеличении толщины оболочки или же локального утолщения. При этом эффективность броневых листов на порядок ниже, чем увеличение толщины оболочки.

На рис. 8 приведена обобщающая гистограмма, наглядно показывающая эффективность рассмотренных решений по снижению остаточных деформаций в котле. Лучший результат показали варианты с усилением котла шпангоутами.

Увеличение толщины котла на 50 % уменьшает глубину кармана в 3 раза. Применение броневых листов в зоне лежней позволит уменьшить глубину кармана в 1,5 раза, что является менее эффективным чем увеличение толщины листов котла, но при этом более технологичным, благодаря простой технологии монтажа на уже работающие вагоны-цистерны.

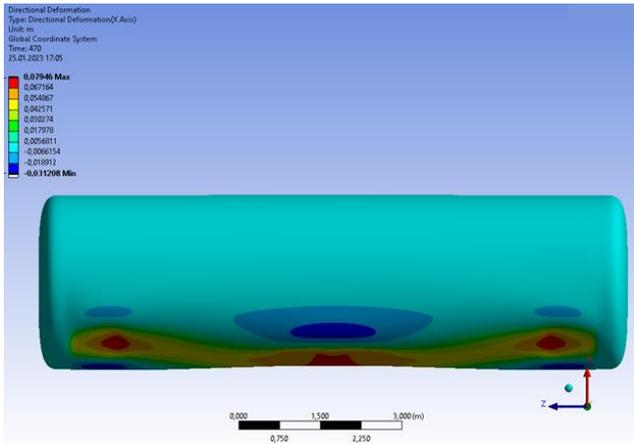
Таблица 2

Величина деформации и глубина кармана

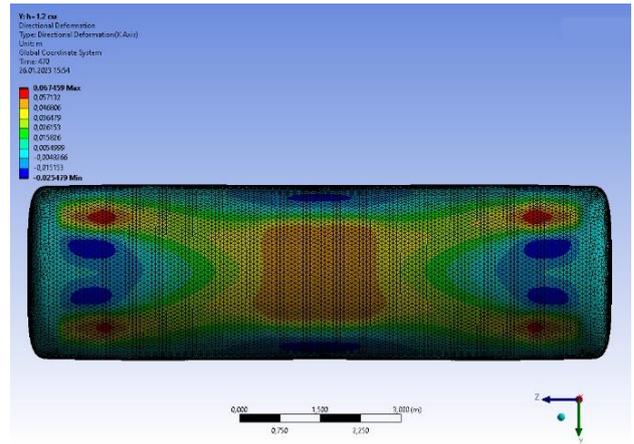
Table 2

Deformation amount and pocket depth

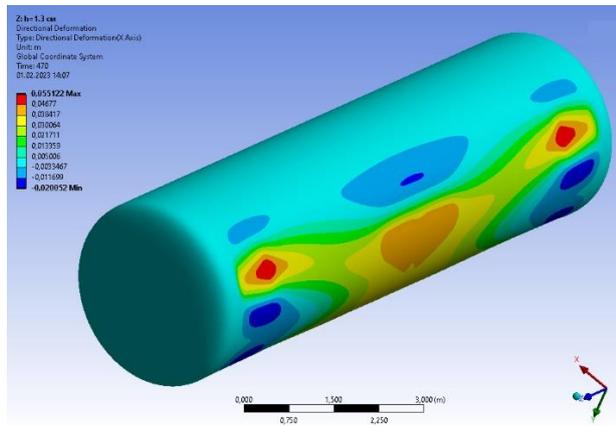
| Вариант | Деформация в области лежневых опор, см | Глубина кармана, см |
|---|--|---------------------|
| Толщина листа котла 1 см (базовый расчет) | 4,03 | 9,7 |
| Толщина листа котла 1,1 см | 2,9 | 7,6 |
| Толщина листа котла 1,2 см | 2,3 | 5,9 |
| Толщина листа котла 1,3 см | 1,9 | 4,5 |
| Толщина листа котла 1,5 см | 1,1 | 2,9 |
| Котел с броневым листом | 0,77 | 6,7 |
| Котел с внутренними шпангоутами | 0,2 | 0,8 |
| Котел с внешними шпангоутами | 0,27 | 0,6 |



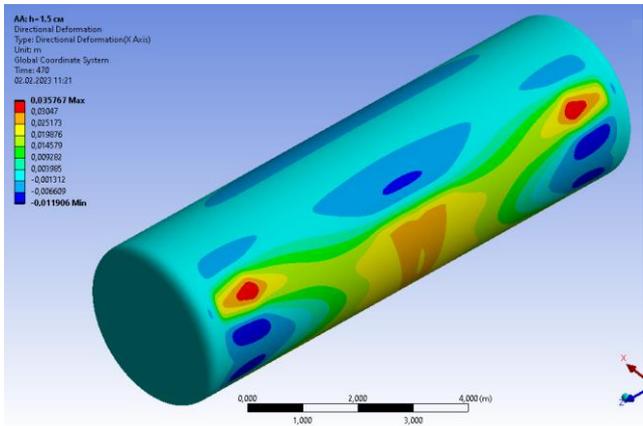
а)



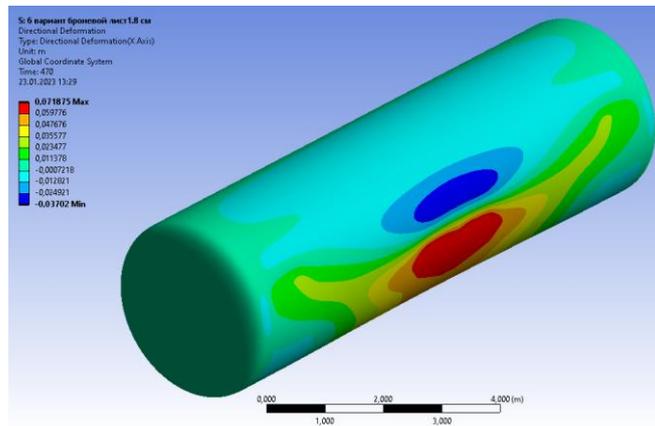
б)



в)



г)



д)

Рис. 4. Деформация котла с броневым листом: а - толщина листа 1,1 см; б - толщина листа 1,2 см; в - толщина листа 1,3 см; г - толщина листа 1,5 см; д - толщина листа 1,8 см
Fig.4. The deformation of a tank car shell equipped with an armor plate thickness of 1.1 cm: а - plate thickness of 1.1 cm; б - plate thickness of 1.2 cm; в - plate thickness of 1.3 cm; г - plate thickness of 1.5 cm; д - plate thickness of 1.8 cm

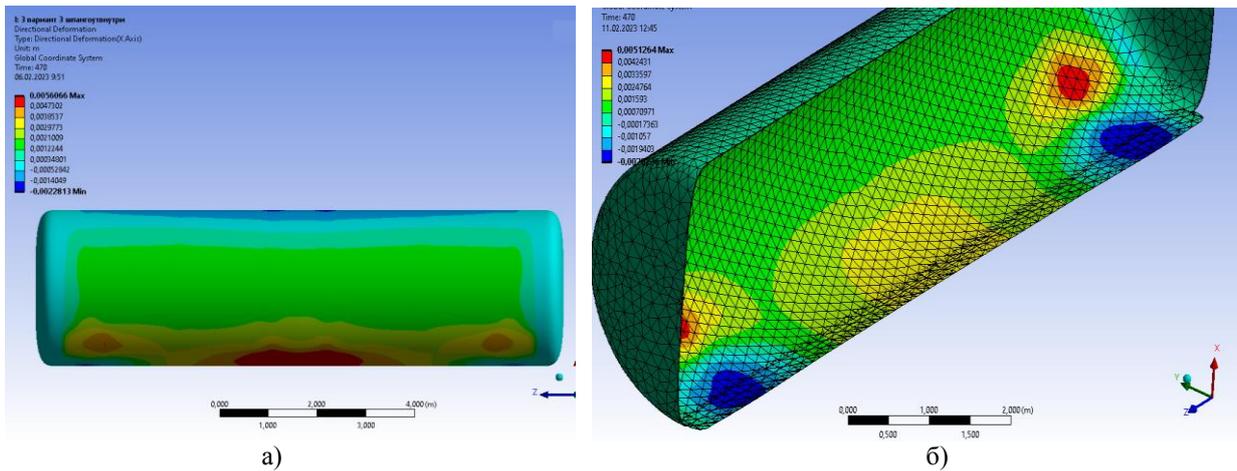


Рис. 5. Деформация котла, укрепленным шпангоутами: а - внутренние шпангоуты; б - наружные разрезные шпангоуты
 Fig.5. The deformation of a tank car shell with timber reinforcement. а - inside timbers; б - outside split timbers

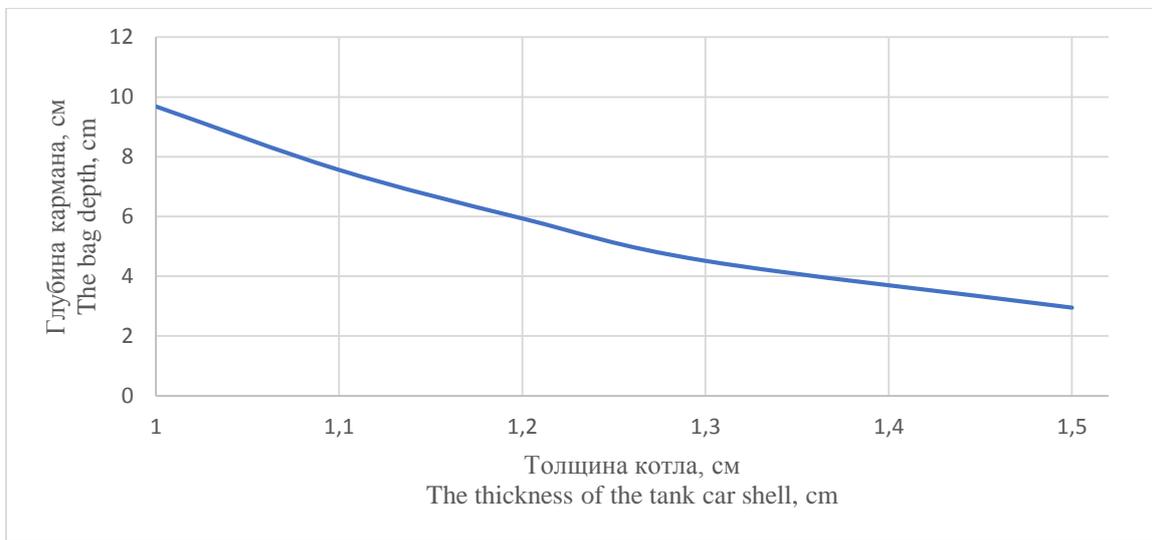


Рис. 6. Зависимость глубины кармана от толщины котла
 Fig.6. The dependence of the bag's depth on the thickness of the tank car shell

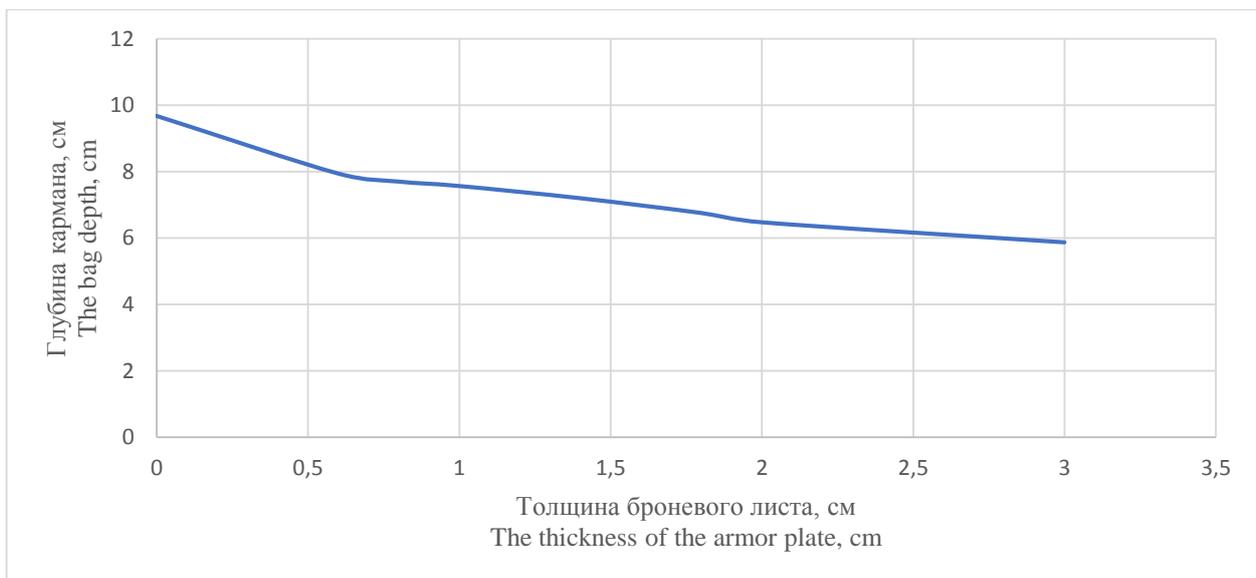


Рис. 7. Зависимость глубины кармана от толщины броневых листа
 Fig.7. The dependence of the bag's depth on the thickness of the armor plate

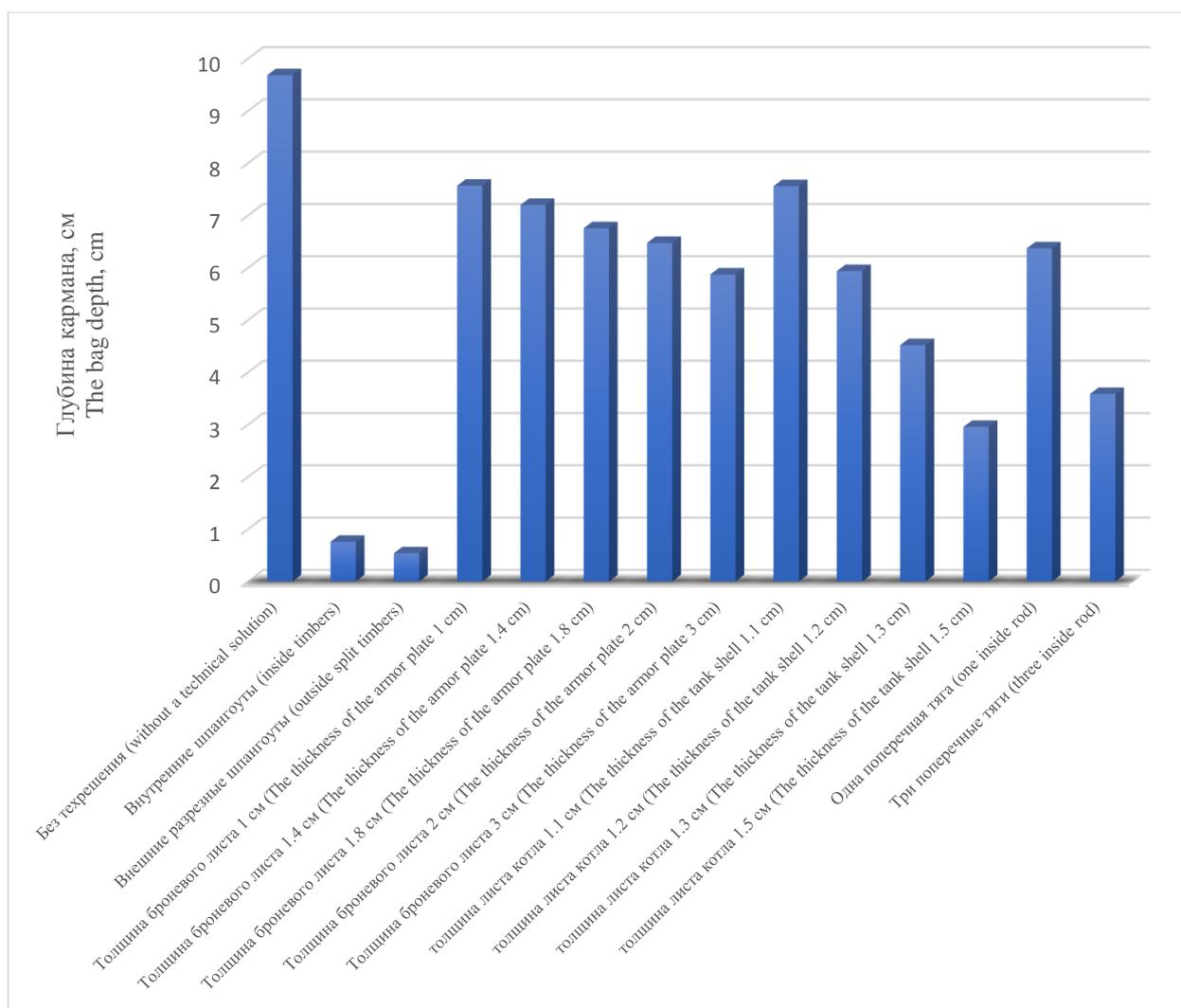


Рис. 8. Эффективность рассмотренных технических решений
 Fig.8. Efficiency of the considered technical construction

Закключение

Применение тяг уменьшает глубину кармана в 3 раза, но сложность установки тяг внутри котла снижает перспективу применения.

Усиление котла шпангоутами является самым эффективным решением из рассмотренных, позволяющая уменьшить

глубину кармана в 15 раз. При этом процесс установки внешних разрезных шпангоутов, наряду с броневым листом, технологичный.

В дальнейшем планируется разработать методику подсчета объема остающегося груза в карманах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов К. В. Нагруженность кузова полувагона глухого типа при падении глыбы груза : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Герасимов Кирилл Вячеславович; Брянский государственный технический университет. М., 2017. 20 с.
2. Маслов И. Г. Состояние котла цистерны при воздействии очага пламени в аварийной ситуации : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореф. дисс. ... канд. техн. наук /

- Маслов Илья Геннадьевич; Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II. М., 2016. 24 с.
3. Шишкин Д. М. Методы расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования : специальность 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела» : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Шишкин Дмитрий Михайлович; Самарский государственный технический университет. Самара, 2021. 20 с.

4. Архипов А. В., Смольянинов А.В. Концентрация напряжений в зоне геометрических отклонений формы котла цистерны. *Транспорт Урала*. 2007. №1 (12). С. 53-64.
5. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 318 с.
6. Зотеев В.Е., Макаров Р.Ю. Численный метод определения параметров модели ползучести в пределах первых двух стадий. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2017. Т. 16, № 2. С. 145-156.
7. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Феноменологический метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций в полой поверхностно упрочненном цилиндрическом образце. *ПММ*. 2013. № 1(45). С. 168-177.
8. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.
9. Numerical methods in finite element analysis / Bathe, K.-J., Wilson E. L. NJ : Prentice Hall, 1976. 544 p.
10. Finite element procedures : 2nd edition / Bathe, K.-J. NJ : Prentice Hall, 2014. 1043 p.
11. An introduction to finite element analysis / Norrie, D. H. de Vries G. New York : Academic Press, 1978. 301 p.

REFERENCES

1. Gerasimov KV. Loading of the gondola car body when a block of cargo falls [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; Bryansk State Technical University; 2017.
2. Maslov IG. The condition of the tank boiler when exposed to a flame in an emergency situation [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; Moscow State University of Railway Engineering; 2016.
3. Shishkin DM. Methods of calculating residual stresses in surface-hardened prismatic parts with stress concentrators under rheological deformation [abstract of dissertation]. [Samara (RF)]; Samara State Technical University; 2021.
4. Arkhipov AV, Smolyaninov AV. Stress concentration in the zone of geometric deviations of the tank boiler. *Transport of the Urals*. 2007;1(12):53-64.
5. Maze J. Theory and problems of mechanics of solid media. Moscow: LKI Publishing House; 2007.
6. Zoteev VE, Makarov RYu. Numerical method for determining the parameters of the creep model within the first two stages. *Vestnik of samara university. Aerospace and mechanical engineering*. 2017;16(2):145-156.
7. Radchenko VP, Saushkin MN. Phenomenological method for calculating residual stresses and plastic deformations in a hollow surface-hardened cylindrical sample. *The Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2013;1(45):168-177.
8. Rychkov SP. Modeling of structures in Femap environment with NX Nastran. Moscow: DMK Press; 2013.

12. The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics / Zienkiwicz O. C., Cheung Y. New-York : McGraw-Hill Book Company, 1967. 272 p.
13. Finite elements and approximation / Zienkiewicz, O.C., Morgan K. New York : Wiley, 1983. 328 p.
14. Козлов М. П. Определение напряжений в оболочках цилиндрических частей котлов цистерн. *Транспорт Урала*. 2009. № 3 (22). С. 71 – 76.
15. Hoger A. On the determination of residual stress in an elastic body. *Journal of Elasticity*. 1998;16:303-324.
16. Емельянов И.Г., Миронов В.И., Якушев А.В., Кузнецов А.В. Контактное взаимодействие котла вагона-цистерны с лежневыми опорами. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13, № 1(2). С. 436-439.
17. Kim S.H., Kim C.H., Oh H. [et al.] Residual stresses and viscoelastic deformation of an injection molded automotive part. *Korea-Australia rheology journal*. 2007;19(4).183-190.
18. ГОСТ 5520-79. Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением : технические условия. М. : Изд-во стандартов, 2003. 15 с.
9. Bathe K-J, Wilson EL. Numerical methods in finite element analysis. NJ: Prentice Hall; 1976.
10. Bathe K-J. Finite element procedures. 2nd ed. NJ: Prentice Hall; 2014.
11. Norrie DH, de Vries G. An introduction to finite element analysis. New York: Academic Press; 1978.
12. Zienkiwicz OC, Cheung Y. The finite element method in structural and continuum mechanics. New-York: McGraw-Hill Book Company; 1967.
13. Zienkiewicz OC, Morgan K. Finite elements and approximation. New York: Wiley; 1983.
14. Kozlov MP. Determination of stresses in the shells of cylindrical parts of tank boilers. *Transport of the Urals*. 2009;3(22):71 – 76.
15. Hoger A. On the determination of residual stress in an elastic body. *Journal of Elasticity*. 1998;16:303-324.
16. Emelyanov IG, Mironov VI, Yakushev AV, Kuznetsov AV. Contact interaction of the boiler of a tank car with leaning supports. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011. Vol. 13, No. 1(2). pp. 436-439.
17. Kim SH, Kim CH, Oh H. [et al.] Residual stresses and viscoelastic deformation of an injection molded automotive part. *Korea-Australia rheology journal*. 2007;19(4).183-190.
18. GOST 5520-79. Rolled sheet of carbon, low-alloy and alloy steel for boilers and vessels operating under pressure : technical conditions. М. : Publishing House of Standards, 2003. 15 p.

Информация об авторах:

Сурнин Артем Юрьевич – аспирант Российского университета транспорта (РУТ(МИИТ)); тел. 89013473427.

Беспалько Сергей Валерьевич - доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ(МИИТ)); тел. 8-905-585-85-36.

Surnin Artem Yuryevich – Postgraduate Student of Russian University of Transport (RUT (MIIT)); phone: 89013473427.

Bespalko Sergey Valeryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cars and Car Facilities at Russian University of Transport (RUT (MIIT)); phone: 8-905-585-85-36.

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 15.05.2023; одобрена после рецензирования 15.06.2023; принята к публикации 27.06.2023. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 15.04.2023; approved after review on 15.06.2023; accepted for publication on 27.06.2023. 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 Board of the journal *Transport Engineering*.