

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.3

С. В. БЕСПАЛЬКО<sup>1</sup>, В. И. БОГАЧЕВ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения», ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, Россия, 127994, эл. почта bespalco@hotmail.ru

<sup>2\*</sup> Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения», ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, Россия, 127994, эл. почта vy-bogachev@yandex.ru

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДНИЩА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ

**Цель.** Определить такое значение вылета днища, при котором обеспечивается максимальная грузоподъемность вагона-цистерны при удовлетворении условий прочности котла. **Методика.** Решение поставленной задачи выполнялось с использованием специализированного программного комплекса NASTRAN. Расчетная схема представляет собой конечно-элементную модель котла железнодорожной четырехосной цистерны модели 15-1443. Нагрузка в расчетной схеме была представлена в виде давления, значение которого принималось равным 0,4 МПа. Определялось напряженное состояние модели котла. Величина вылета днища котла изменялась в пределах от 0,2 м до 1,5 м. **Результаты.** Из условия прочности рациональное значение вылета составило 0,47 м. При этом значении вылета днища возможно улучшить параметры базовой цистерны: увеличить объем котла и повысить грузоподъемность на 0,7 т. Исследована возможность дополнительного увеличения объема котла и грузоподъемности за счет увеличения толщины листов днища до 13 мм. В этом случае оптимальным вариантом следует признать днище с вылетом 0,4 м. Грузоподъемность цистерны с таким днищем превысила грузоподъемность базовой цистерны на 1 т. **Научная новизна.** В статье предложен способ расчетного обоснования увеличения объема котла вагона-цистерны. Увеличение объема, а, следовательно, и грузоподъемности, позволяет повысить производительность вагона. По результатам расчетов получена зависимость максимальных эквивалентных напряжений от вылета днища. **Практическая значимость.** Показано, что уменьшение вылета днища при удовлетворении условий прочности котла позволит улучшить параметры существующей модели железнодорожной цистерны. Результаты могут быть использованы при проектировании новых цистерн.

*Ключевые слова:* цистерна; котел; вылет днища; грузоподъемность; метод конечных элементов

#### Введение

Необходимость обеспечения надежности наливного подвижного состава и безопасности перевозок на железнодорожном транспорте определяет актуальность решения проблемы расчетной оценки несущей способности элементов конструкций, работающих в сложных условиях эксплуатации [9].

#### Цель

Одним из важнейших параметров вагона-цистерны является грузоподъемность. Увеличение грузоподъемности позволяет повысить производительность вагона, т.е. количество перевозок, выполняемых вагоном в единицу времени, увеличить вес поездов, улучшить использование мощности локомотивов и станционных устройств, снизить расходы на маневровую ра-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

боту, текущее содержание, обслуживание вагонов и т.д. В конечном счете, все это приводит к увеличению провозной способности железных дорог и снижению себестоимости перевозок.

**Методы**

Для расчета вагонных конструкций инженеры и научные работники используют специализированные алгоритмы расчета несущих узлов [1, 2] или специализированные программные комплексы [3, 5-7], реализующие метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ позволяет учесть сложность геометрии конструкции [5], физические свойства материала, влияние жидкого заполнения [6,7]. Построив с нужной степенью детализации расчетную схему, можно достаточно полно отразить в ней свойства реального объекта.

В работе [3] одной из задач по созданию цистерн безрамной конструкции нового поколения является увеличение объема цистерны. Отмечается, что для разных габаритов можно определить предельный объем котла, исходя из базы цистерны и допускаемого свеса котла за лобовой лист.

Существует другой способ увеличения объема цистерны, который рассматривается в данной статье.

Днище является частью конструкции котла, объем которой в определенной степени влияет на параметры цистерны в целом.

В связи с этим, интерес представляет задача нахождения такого значения вылета днища, при котором обеспечивается максимальная грузоподъемность при удовлетворении условий прочности котла.

Решение поставленной выше задачи выполнялось с использованием программного комплекса NASTRAN. Объектом исследования был выбран котел четырехосной цистерны модели 15-1443 для перевозки бензина и светлых нефтепродуктов.

Расчетная схема представляет собой конечно-элементную модель котла, в которой учитывалась симметрия конструкции относительно поперечной вертикальной плоскости, т.е. рассматривалась половина котла, получаемая при рассечении этой плоскостью. В плоскости симметрии на модель котла накладывались соответствующие граничные условия. В модели не учитывались верхняя и нижняя горловины, сливной уклон. Это основывается на том, что влияние перечисленных элементов конструк-

ции на напряженно-деформированное состояние (НДС) днища незначительно.

Оболочка котла радиусом 1,5 м представлена совокупностью сеток конечных элементов (КЭ сеток) цилиндрической части и эллиптического днища. КЭ сетки создавались вращением [8] вокруг продольной горизонтальной оси котла, причем были созданы отдельные КЭ сетки для броневых, двух верхних и двух продольных листов котла. При создании КЭ сетки эллиптического днища учтено, что днище имеет цилиндрический участок длиной 0,05 м. При построении конечно-элементной схемы использовались следующие конечные элементы: плоские четырехугольные – для листов обечайки котла, плоские четырехугольные и треугольные – для днища.

Конечно-элементная модель включает 23836 конечных элементов и 23837 узлов.

Толщины листов заданы в свойствах элементов и составляют: 9 мм – для верхних и продольных листов обечайки; 11 мм – для броневых листов и 10 мм – для днища. Материал котла задан как изотропный со следующими характеристиками: модуль Юнга равен  $2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона – 0,3.

Для днища котла внутреннее давление является определяющим внешним воздействием. Из результатов экспериментальных исследований [2] следует, что нагрузка на котел внутренним давлением вызывает в днищах напряжения, составляющие не менее 80 % от суммарных напряжений, которые характеризуют прочность конструкций согласно требованиям «Норм...» [4].

Поэтому, нагрузка в расчетной схеме была представлена в виде давления, значение которого принималось равным 0,4 МПа (давления, создаваемого в котле при гидравлическом испытании). Влияние остальных сил учитывалось в величине допускаемых напряжений для днища по первому расчетному режиму. В соответствии с «Нормами...» допускаемые напряжения  $[\sigma]$  для стали 09Г2С для первого расчетного режима принимаются равными пределу текучести материала, взятому с коэффициентом 0,9. Предел текучести равен 325 МПа.

Величина вылета днища согласно поставленной задаче изменялась в пределах от 0,2 м до 1,5 м, поэтому описанная расчетная модель котла создавалась для каждого значения вылета.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Вследствие краевого эффекта в переходной зоне от цилиндрической части котла к эллиптическому днищу можно наблюдать максимальный всплеск эквивалентных напряжений. С увеличением вылета их величина снижается. При вылете днища равном 1,0 м величины максимальных эквивалентных напряжений в обечайке котла и эллиптическом днище практически равны. Максимум напряжений смещается в цилиндрический участок днища при величине вылета больше 1,0 м. Дальнейшее его увеличение приводит к росту напряжений в обечайке и снижению их в днище, однако при этом уменьшается и объем котла.

На рис. 1 изображен график зависимости максимальных эквивалентных напряжений в днище котла от величины его вылета.

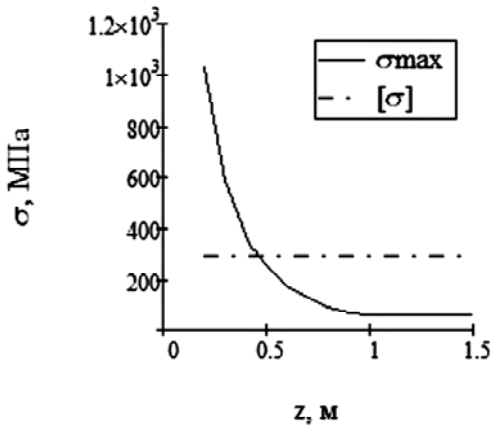


Рис. 1. График зависимости максимальных эквивалентных напряжений  $\sigma_{\max}$  в днище котла от величины его вылета  $z$

Результаты расчетов показали, что при величине вылета равной 0,4 м максимальные эквивалентные напряжения в днище составляют 374 МПа, а при вылете 0,5 м – 253 МПа при величине допускаемых напряжений 292,5 МПа.

Для уточнения оптимальной величины вылет днища варьировался с более мелким шагом 0,01 м, начиная с вылета 0,4 м. Оказалось, что при величине вылета 0,47 м эквивалентные напряжения составляют 283 МПа. Именно это значение было принято в качестве оптимального по условию прочности.

Интерес также представлял вопрос о том, насколько возможно уменьшить вылет днища, а соответственно, увеличить объем котла, за счет увеличения толщины днища. Оказалось, что при толщине листов 13 мм днища с вылетом 0,4

м возможно дополнительно понизит величину эквивалентных напряжений с 374 МПа до 282 МПа и, следовательно, принять этот вариант котла за оптимальный.

На рис. 2 изображены графики зависимости максимальных эквивалентных напряжений в днище котла от величины его вылета при варьировании толщиной.

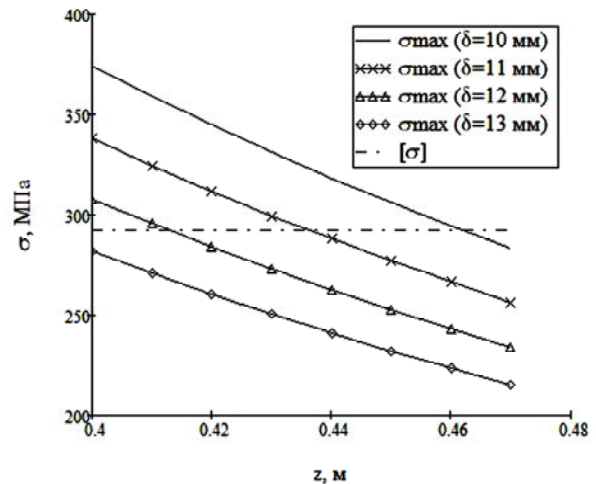


Рис. 2. Графики зависимости максимальных эквивалентных напряжений в днище котла от величины его вылета при варьировании толщиной  $\delta$

В заключении был выполнен расчет объема котла и грузоподъемности цистерны 15-1443 с различными вылетами днищ котла при неизменной общей длине последнего. Получена зависимость объема и грузоподъемности от вылета днища.

При оптимальном, по условию прочности, вылете днища равном 0,47 м, объем увеличивается практически на 1 м<sup>3</sup>, а грузоподъемность повышается на 0,7 т по сравнению с базовым вариантом цистерны с вылетом 0,66 м. У цистерны с вылетом днища 0,4 м толщиной 13 мм грузоподъемность увеличивается до 1 т по сравнению с базовой. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты расчетов

Вылет днища, м	Объем котла, м <sup>3</sup>	Грузоподъемность, т
0,40	74,44	61,00
0,47	74,11	60,73
0,66	73,22	60,00

**Выводы**

1. Проведена серія розрахунків на визначення НДС днища котла цистерни 15-1443 з використанням програмного комплексу NASTRAN, для чого побудована кінцево-елементна розрахункова схема котла з різними значеннями вильоту днища.

2. По результатам розрахунків отримана залежність максимальних еквівалентних напружень від вильоту днища.

3. З умови міцності раціональне значення вильоту склало 0,47 м. При цьому значенні вильоту днища можливо покращити параметри базової цистерни: збільшити об'єм котла і підвищити грузопідйомність на 0,7 т.

4. Досліджено можливість додаткового збільшення об'єму котла і грузопідйомності за рахунок збільшення товщини листів днища до 13 мм. В цьому випадку оптимальним варіантом слід визнати днище з вильотом 0,4 м. Грузопідйомність цистерни з таким днищем перевищила грузопідйомність базової цистерни на 1 т.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Козлов, М. П. Определение напряжений в оболочках цилиндрических частей котлов цистерн / М. П. Козлов // Транспорт Урала. – 2009. – № 3 (22). – С.71–76.
2. Медведев, В. П. Исследование прочностных характеристик сложных оболочек вращения, применяемых в цистерностроении : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Медведев Вячеслав Павлович ; МИИТ. – М., 1972. – 215 с. – Библиогр.: С. 205–212.
3. Нагруженность вагонов-цистерн при переходных режимах движения поездов : монография / Г. И. Богомаз, Н. Е. Науменко, А. Н. Пшинько, С. В. Мямлин. – К. : Наукова думка, 2010. – 216 с.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
5. Павлюченков, М. В. Влияние начальных несовершенств котлов железнодорожных цистерн на их напряженно-деформированное состояние [Электронный ресурс] / М. В. Павлюченков // Зб. наук. пр. Укр. державної акад. заліз. трансп. – 2011. – Вип. 123. – С.136–141. – Режим доступа: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2011\\_123/n123-136.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2011_123/n123-136.pdf). – Загл. с экрана.
6. Путято, А. В. Расчет на прочность котла вагона-цистерны с учетом решения задачи гидроупругости [Электронный ресурс] / А. В. Путято // Зб. наук. пр. Укр. державної акад. заліз. трансп. – 2009. – Вип. 108. – С.115–120. – Режим доступа: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2009\\_108/n108-115.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2009_108/n108-115.pdf). – Загл. с экрана.
7. Путято, А. В. Совершенствование элементов конструкций вагона-цистерны с учетом взаимодействия с перевозимым жидким грузом / А. В. Путято // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 1(25). – С.113–122.
8. Рычков, С. П. MSC.visualNASTRAN для Windows / С. П. Рычков – М. : НТ Пресс, 2004. – 552 с.
9. Mohd, Rapik Saat, Christopher, P. L. Barkan. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety / Rapik Saat Mohd, Barkan Christopher P. L. // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – Vol. 189. – issues 1–2, 15. – P. 62–68.

С. В. БЕСПАЛЬКО<sup>1</sup>, В. І. БОГАЧЕВ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Федеральна державна бюджетна освітня установа вищої професійної освіти «Московський державний університет шляхів сполучення», вул. Образцова, д. 9, стр 9, Москва, Росія, 127994, ел. пошта [bespalco@hotmail.com](mailto:bespalco@hotmail.com).

<sup>2\*</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Федеральна державна бюджетна освітня установа вищої професійної освіти «Московський державний університет шляхів сполучення», вул. Образцова, д. 9, стр 9, Москва, Росія, 127994, ел. пошта [vy-bogachev@yandex.ru](mailto:vy-bogachev@yandex.ru)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ДНИЩА НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН КОТЛА ЦИСТЕРНИ

**Мета.** Визначити таке значення вильоту днища, при якому забезпечується максимальна вантажопідйомність вагона-цистерни при задоволенні умов міцності котла. **Методика.** Рішення поставленої задачі виконувалося з використанням спеціалізованого програмного комплексу NASTRAN. Розрахункова схема являє собою звичайно-елементну модель котла залізничної чотирьохвісної цистерни моделі 15-1443. Навантаження в розрахунковій схемі було представлено у вигляді тиску, значення якого приймалося рівним 0,4 МПа. Визначається напружений стан моделі котла. Величина вильоту днища котла змінювалася в межах від 0,2 м до 1,5 м. **Результати.** З умови міцності раціональне значення вильоту склало 0,47 м. При цьому значенні вильоту днища можливо поліпшити параметри базової цистерни: збільшити обсяг котла і підвищити вантажопідйомність на 0,7 т. Досліджено можливість додаткового збільшення обсягу котла і вантажопідйомності за рахунок збільшення товщини листів днища до 13 мм. У цьому випадку оптимальним варіантом слід визнати днище з вильотом 0,4 м. Вантажопідйомність цистерни з таким днищем перевищила вантажопідйомність базової цистерни на 1 т. **Наукова новизна.** У статті пропонується спосіб розрахункового обґрунтування збільшення обсягу котла вагона-цистерни. Збільшення обсягу, а отже, і вантажопідйомності, дозволяє підвищити продуктивність вагона. За результатами розрахунків отримано залежність максимальних еквівалентних напружень від вильоту днища. **Практична значимість.** Показано, що зменшення вильоту днища при задоволенні умов міцності котла дозволить поліпшити параметри існуючої моделі залізничної цистерни. Результати можуть бути використані при проектуванні нових цистерн.

*Ключові слова:* цистерна; котел; виліт днища; вантажопідйомність; метод кінцевих елементів

S. V. BESPALKO<sup>1</sup>, V. I. BOGACHEV<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of «Wagons», Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Obraztsova Str. 9, bld.9, Moscow, Russia, 127994, e-mail bespalco@hotmail.ru

<sup>2\*</sup> Department of «Wagons», Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Obraztsova Str. 9, bld.9, Moscow, Russia, 127994, e-mail vy-bogachev@yandex.ru

## TANK HEAD PARAMETERS ASSESSMENT OF INFLUENCE ON TANK CAR BOILER STRESS AND STRAIN STATE

**Purpose.** The purpose of the investigation is to estimate such value of a tank head depth wherein the maximum capacity of vehicle is provided and a tank vessel durability meets the requirements. **Methodology.** The problem solution was carried out with using the finite element analysis program NASTRAN. The finite element model is a tank shell of the railway eight-wheel tank car of model 15-1443. The load was presented as pressure. The value was accepted equal 0,4 MPa. The finite element model strain-stress state was analyzed. The tank head depth changed ranging from 0,2 m to 1,5 m. **Findings.** The rational tank head depth was 0,47 m from the tank vessel durability condition. This allows to improve the basic tank car parameters. It means to increase the tank vessel volume and to increase the capacity at 0,7 ton. Authors has investigated that an additional increase of the tank vessel volume and the vehicle capacity can be achieved when the tank head sheets thickness as high as 13 mm. In this case it is necessary to recognize that the rational tank head depth is 0,4 m. Tank capacity can be increase at 1 ton. **Originality.** This paper presents the method of analysis of the tank car volume increase. The tank car volume increase and thus a capacity of vehicle increase allows to improve the car productiveness. Calculations results allow to give the dependence of the maximum equivalent stresses in a tank head which the depth of the one change. **Practical value.** It is shown that the tank head depth reduction will allow to improve parameters of the existing railway tank when the tank vessel durability meets the requirements. Investigation results can be used when new tank cars are designed.

*Keywords:* tank; boiler; tank head depth; capacity of vehicle; finite element method

## REFERENCES

1. Kozlov M.P. Opredeleniye napryazheniy v obolochkakh tsilindricheskikh chastei kotlov tsistern [Stress calculation in the shells of cylindrical parts of tank-cars boilers]. *Transport Urala - Transport of the Urals*, 2009, no. 3 (22), pp. 71-76.
2. Medvedev V.P. *Issledovaniye prochnostnykh kharakteristik slozhnykh obolochek vrashcheniya, primenyaemykh v tsisternostroyenii*. Kand., Diss. [Research of strength characteristics of complex rotational shells applied in a tank car building. Cand. Diss.]. Moscow, 1972. 215 p.
3. Bogomaz G.I., Naumenko N.E., Pshinko A.N., Myamlin C.V. *Nagruzhenost vagonov-tsistern pri perekhodnykh rezhimakh dvizheniya poyezdov* [Tank Car Loading in Transition Regimes of Train Operation]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2010. 215 p.
4. *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Requirements of the calculation and the design of cars for railways with the gauge equal to 1520 mm from Ministry of Railways of the Russian Federation (for unpowered cars)]. Moscow, GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996. 319 p.
5. Pavlyuchenkov M.V. Vliyaniye nachalnykh nesovershenstv kotlov zheleznodorozhnykh tsistern na ikh napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye (The impact of the railway tank cars boilers initial imperfection on its stress and strain state). *Zbirnik naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznichnoho transportu - Proc. of Ukraine State Academy of Railway Transport*, 2011, issue 123. pp. 136-141. Available at: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2011\\_123/n123-136.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2011_123/n123-136.pdf) (Accessed 20 May 2012).
6. Putyato A.V. Raschet na prochnost kotla vagona-tsisterny s uchetom resheniya zadachi gidrouprugosti (The strength analysis of the tank car boiler including a solution of the hydro elasticity problem). *Zbirnik naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznichnoho transportu – Proc. of Ukraine State Academy of Railway Transport*, 2009, issue 108. pp. 115 -120. Available at: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2009\\_108/n108-115.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2009_108/n108-115.pdf) (Accessed 20 May 2012).
7. Putyato A.V. Sovershenstvovaniye elementov konstruktsiy vagona-tsisterny s uchetom vzaimodeystviya s perevozymym zhidkim gruzom [Perfection of elements of designs of the tankcar taking into account interacting with a transported liquid cargo]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2010, no. 1 (25), pp. 113-122.
8. Rychkov S.P. *MSC.visualNASTRAN dlya Windows* [MSC.visualNASTRAN for Windows]. Moscow, NT Press Publ., 2004. 552 p.
9. Mohd Rapik Saat, Christopher P.L. Barkan Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 189, issues 1–2, 15, pp. 62-68.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. В. Третьяковым (Россия); д.т.н., проф. В. Л. Горобцом (Украина)

Поступила в редколлегию 04.12.2012

Принята к печати 22.02.2013