

УДК 629.463.32

**И. Г. Киселев, В. В. Галов, С. Б. Комиссаров****ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА  
ВЯЗКИХ ГРУЗОВ ПРИ СЛИВЕ ИЗ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН**

Дата поступления: 14.01.2016

Решение о публикации: 17.02.2016

**Цель:** Решить проблемы, возникающие при сливе вязких грузов из железнодорожных цистерн с электронагревом. Показать возможность совершенствования подвижного состава данного типа. **Методы:** При решении задачи теплопроводности для перевозимого груза применен метод конечных элементов. **Результаты:** Проанализированы конструкция и особенности выгрузки для четырехосной железнодорожной цистерны модели 15-1532, предназначенной для перевозки жидкого каменноугольного пека, и моделей 15-1480 и 15-1482 – для перевозки жидкой серы. Приведена информация об отрицательном влиянии грузов и их паров на организм человека, что говорит о необходимости сокращения времени контакта персонала с грузом. Поставлена задача теплопроводности, приведено её решение для определения поля температур в котле железнодорожной цистерны при электронагреве груза. Проанализирована конструкция вагонов-цистерн. На основании этого анализа рассчитано температурное поле наиболее неблагоприятного конструктивного элемента котла вагона-цистерны при сливе разогреваемого груза. На основании полученных градиентов температур спрогнозировано поведение оболочки котла вагона-цистерны в части появления остаточных деформаций расчетного элемента. Выявлена проблема неравномерного нагрева вязкого груза для существующих цистерн: перегрев нижней части котла при недостаточном нагреве верхних слоев груза. Предложено техническое решение для перераспределения тепловых нагрузок на котел цистерны, позволяющие сократить время слива груза из цистерны и увеличить срок службы подвижного состава. Сделан вывод о необходимости модернизации конструкции вагонов-цистерн для перевозки вязких и загустевающих грузов. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при конструировании новых моделей вагонов-цистерн с электронагревом груза, а также для модернизации систем электронагрева имеющегося парка подвижного состава.

Вагон-цистерна, электрические нагреватели, температурное поле.

**Igor G. Kiselev**, Dr. Sci. (Eng.), professor, kteploteh@pgups.ru; **Vladimir V. Galov**, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, v\_galov@hotmail.com; **\*Sergey B. Komissarov**, post-graduate student, s.b.komissarov@gmail.com (Petersburg State Transport University) PERSPECTIVES FOR MODERNISATION OF ELECTRICAL HEATING OF VISCOUS CARGOES FOR UNLOADING CISTERN CARS

**Objective:** To solve problems appearing when unloading viscous cargo from cistern cars equipped with electrical heating. To demonstrate possibility of improving rolling stock of this type. **Methods:** Finite-elements method is applied to solving heat conductivity problems for the transported cargo. **Results:** Design and unloading peculiarities were analysed for model 15-1532 four-axle cistern car (designed for transportation of liquid colar-tar asphalt), and for models 15-1480 and 15-1482 (for transportation of liquid sulphur). Information concerning negative influence of these cargoes and their fumes on human organism is provided, which means that the time of contact between personnel and cargo should be reduced. Heat conductivity problem is set, its solution for determining the range of temperatures in the cauldron of the cistern car during electrical heating is provided. Design of cistern cars is analysed. On the

basis of this analysis, temperature field for the most unfavourable design element of the cauldron of cistern car when unloading heated cargo is established. On the basis of thermal gradients thus obtained, behaviour of the cover of a cistern car's cauldron is forecast as regards appearance of permanent deformations of the calculated element. The problem of uneven heating of viscous cargo in existing cistern cars was identified, as bottom part of the cauldron is overheated, and upper layers of the cargo are subject to insufficient heating. A technical solution for redistribution of thermal strain on cistern's cauldron is proposed, allowing to cut the time of unloading cargo from cistern and to increase service life of rolling stock. The conclusion of the need for modernisation of cistern cars design for transportation of viscous and thickening cargoes is reached. **Practical importance:** Results of the study can be applied to designing new models of cistern cars with electrical heating of cargo, as well as for modernisation of electrical heating systems of existing rolling stock.

Cistern car, electrical heaters, temperature field.

В ежедневной практике предприятий, использующих затвердевающие грузы, доставляемые в вагонах-цистернах и требующие предварительного разогрева перед сливом, актуальным остается вопрос ускорения их выгрузки. При использовании подвижного состава с электронагревом груза выявлен ряд недостатков. Решение данного вопроса позволит снизить затраты, связанные с простоем вагонов, повысить оборот вагонов, приумножить количество используемого груза.

### Подвижной состав для перевозки загустевающих грузов

Среди самых распространенных цистерн с электрическим подогревом для перевозки вязких и загустевающих грузов – модели 15-1532, 15-1480 и 15-1482.

Четырехосная железнодорожная цистерна модели 15-1532 предназначена для перевозки жидкого каменноугольного пека при температуре окружающего воздуха до минус 50 °С. Пек должен сохраняться в жидком состоянии при температуре налива 250 °С и окружающей среды минус 30 °С не менее пяти суток.

Груз разогревается электроподогревателями мощностью 90 кВт. Слив происходит при температуре 140–180 °С при скорости разогрева около 2,4 °С в час.

Жидкий пек выделяет пары, которые, соединяясь с воздухом, образуют горючие смеси, способные легко воспламениться от любой искры, нагретых поверхностей и др. Кроме того, пары пека могут вызвать отравление. Попадая на кожу человека, жидкий пек может вызвать ожоги. Отравления и ожоги может вызвать и пыль пека. При солнечном свете токсичные действия пека проявляются сильнее, чем в темноте [4].

Для перевозки жидкой серы служат четырехосные цистерны моделей 15-1480 и 15-1482. Они рассчитаны для работы при температуре окружающего воздуха до минус 50 °С. Сера должна сохраняться в жидком состоянии при температуре налива 150 °С и окружающей среды – минус 25 °С не менее четырех суток, летом – не менее шести суток.

Груз разогревается электроподогревателями мощностью 90 кВт. Слив происходит при температуре 120–125 °С при скорости разогрева около 3,2 °С в час.

Жидкая сера растворяет в себе углеводороды и сероводород, которые образуются при получении серы. При сливе, наливке, хранении жидкой серы выделяются пары серы, органических веществ, керосина, сероводорода и т. д., способные образовать с воздухом горючие смеси, которые могут воспламениться от открытого пламени, нагретых поверхностей, от любой искры, а также при возгорании пиррофорных соединений. Кроме того, пары, вы-

деляющиеся из жидкой серы, могут вызывать отравление, а сама жидкая сера, попадая на кожу человека, – термические ожоги [4].

Время слива указанных грузов, как и время их нежелательного контакта с персоналом, зависит от интенсивности разогрева до температуры, при которой возможен их слив. С другой стороны, превышение допустимых пределов температуры приводит к потере устойчивости оболочки котла и к выходу из строя вагонов-цистерн. Таким образом, для решения этих проблем необходимо рассчитать процесс разогрева, построить температурные поля котла вагонов-цистерн и разогреваемого груза, предложить новые инженерные решения для совершенствования систем разогрева вязких грузов при сливе из железнодорожных цистерн.

### Решение задачи теплопроводности для перевозимого груза

Разогрев загустевающего груза в железнодорожной цистерне характеризуется тепло-

обменом в условиях естественной конвекции. Процесс теплообмена в этом случае сводится к решению задачи теплопроводности с эквивалентным коэффициентом теплопроводности. Решение задачи теплопроводности заключается в определении поля температур в котле железнодорожной цистерны при разогреве груза. С точки зрения зависимости температуры от времени задача является нестационарной [2].

Разогрев груза в железнодорожной цистерне определяет полярную постановку задачи. В качестве расчетной области выбрана половина поперечного сечения средней части котла цистерны (рис. 1). Расчет процесса разогрева в этом случае сводится к решению параболического дифференциального уравнения в частных производных

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda_{\text{экв}} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_{\text{экв}}}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \lambda_{\text{экв}} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right].$$

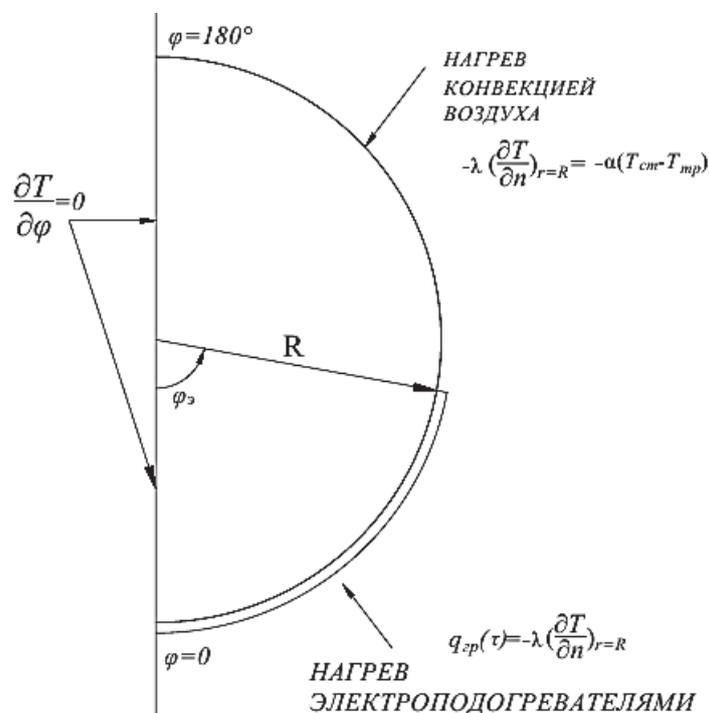


Рис. 1. К постановке краевой задачи теплопроводности расчетная область железнодорожной цистерны со встроенным электронагревом

Уравнение имеет бесчисленное множество решений. Для получения единственного решения конкретизирована задача теплопроводности при заданных условиях однозначности.

Для систем разогрева встроенными электроподогревателями снаружи котла цистерны начальные условия задаются выражением

$$T(r, \varphi) = T_0, \quad 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq \varphi \leq 180^\circ.$$

Граничные условия определяются системами выражений, характеризующих передачу теплоты в разных зонах котла цистерны (рис. 1):

$$q_{\text{гр}}(\tau) = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right), \quad r = R, \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_3;$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = \alpha(T_{\text{н}} - T_{\text{гр}}), \quad r = R, \quad \varphi_3 \leq \varphi \leq 180^\circ.$$

Результатом решения задачи для существующей цистерны стало температурное поле (рис. 2а), характеризующееся перегревом нижней части котла при недостаточном нагреве верхних слоев груза.

В качестве решения выявленной проблемы предложено создать технические устройства, увеличивающие скорость движения воздуха вокруг котла цистерны, что приводит к плавному распределению температур по поверхности котла и создает отток излишней теплоты с днища котла цистерны (рис. 2б).

Данный метод уже используется в промышленности и служит в основном для предотвращения перегрева отдельных участков конструкции из-за неоднородности тепловой изоляции, местных подводов тепла по металлическим деталям у газотурбинных установок [3].

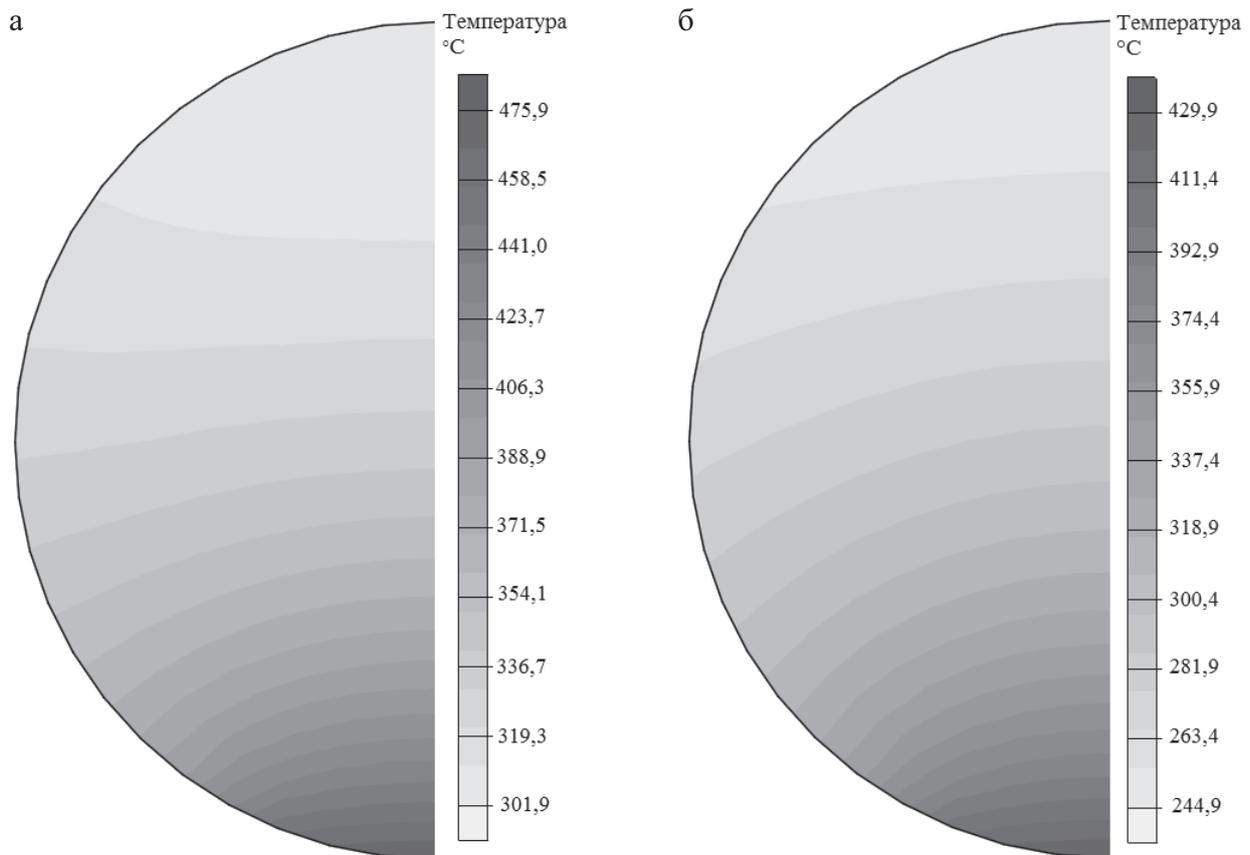


Рис. 2. Температурное поле  $T(x, y, \tau)$  при  $\tau = 6$  ч с естественной (а) и с принудительной (б) конвекцией воздуха

### Расчёт прогиба неблагоприятного элемента котла вагона-цистерны

Анализ конструкции вагонов-цистерн с электронагревом указал на неравномерное распределение нагревателей под котлом, что может привести к недогреву части груза, находящегося в этой области, и, соответственно, к увеличению времени выгрузки.

На основании проведенного анализа рассчитано температурное поле наиболее неблагоприятного конструктивного элемента котла вагона-цистерны при сливе разогреваемого груза (рис. 3). По итогам расчета выявлен

недостаточный нагрев элемента котла цистерны с одной и значительный перегрев данного элемента – с другой стороны (рис. 4).

Вагоны-цистерны для жидкого пека и серы имеют грузоподъемность порядка 60 т, что говорит о серьезных нагрузках на котел вагона цистерны.

Повышенные температуры наряду с воздействием большой массы груза приводят к появлению прогибов оболочки котла цистерн, когда невозможно дальнейшее использование вагона.

С ростом температуры уменьшается значение предельных напряжений, под воздействием которых наблюдается переход упру-

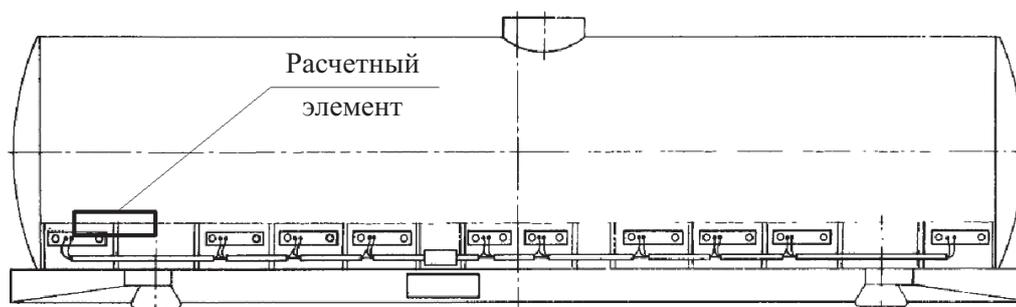


Рис. 3. Оборудование электронагрева цистерны. Расчетный элемент котла цистерны

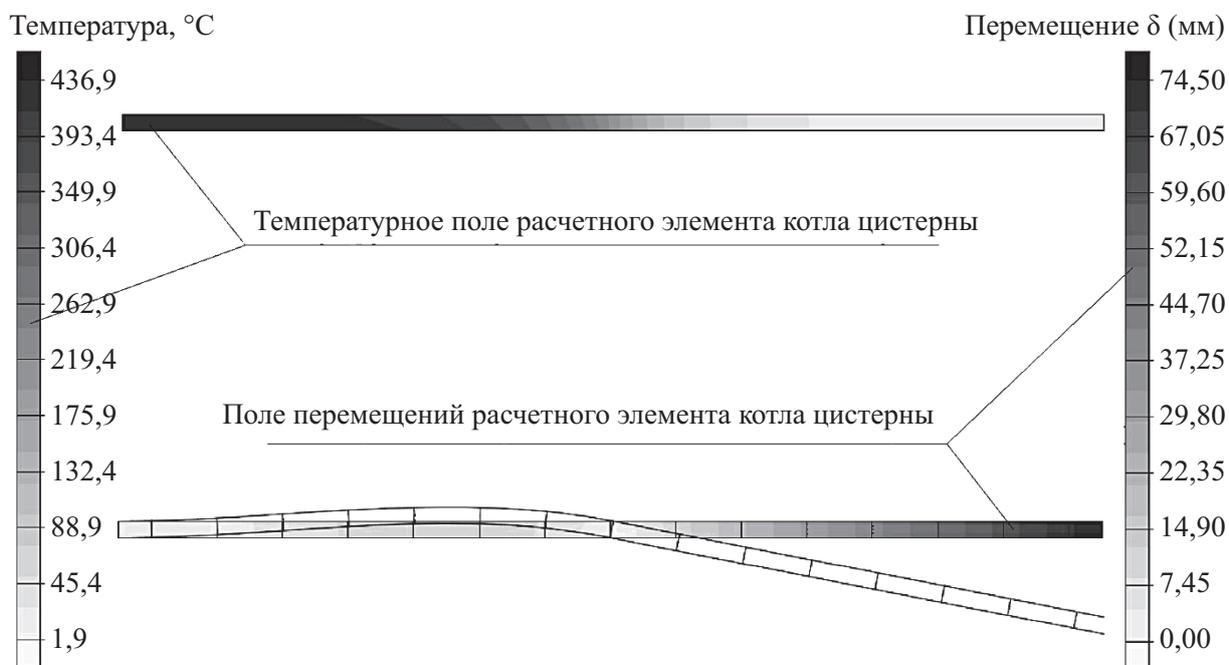


Рис. 4. Температурное поле расчетного элемента котла цистерны.  
Поле перемещений расчетного элемента котла цистерны

гого состояния металла в пластичное (предел текучести), т. е. снижается сопротивление пластической деформации.

На основании полученных температурных напряжений спрогнозировано поведение котла вагона-цистерны в части появления остаточных деформаций расчетного элемента (рис. 4).

Увеличенная величина прогиба в расчете согласно существующим методикам требует списания вагона-цистерны по состоянию котла [1].

Для увеличения срока службы вагонов-цистерн требуется перераспределить электроподогреватели, чтобы вязкий груз нагревался равномерно и снижалось температурное напряжение в оболочке котла.

## Заключение

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что конструкция вагонов-цистерн для перевозки вязких и загустевающих грузов с электронагревом требует модернизации. Модернизация системы разогрева повлечет за собой ускорение выгрузки, а также увеличит срок службы подвижного состава.

## Библиографический список

1. Битюцкий А. А. Методика определения объема ремонта котлов при восстановлении ресурса вагонов-цистерн для перевозки жидкого пека / А. А. Битюцкий, К. И. Рыжов // Совершенствование методов испытаний и диагностики грузовых вагонов: сб. научных трудов. Вып. 2 ; под ред. А. А. Битюцкого ; Инженерный центр вагоностроения. – СПб. : ОМ-Пресс, 2007. – С. 90–100.

2. Галов В. В. Расчет процессов разогрева затвердевающих грузов при сливе из железнодорожной цистерны : методические указания к расчетно-графическим работам по дисциплине «Источники и системы теплоснабжения промышленных предприятий» / сост. В. В. Галов. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – 14 с.

3. Иванов В. А. Эксплуатация энергетического оборудования газопроводов Западной Сибири / В. А. Иванов, Г. В. Крылов, Л. Г. Рафиков. – М. : Недра, 1987. – 143 с.

4. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов : справ. пособие. – М. : МПС РФ ; Изд-во стандартов, 1993.

## References

1. Bityutskiy A. A. & Ryzhov K. I. *Sovershenstvovaniye metodov ispytaniy i diagnostiki gruzovykh vagonov: sbornik nauchnykh trudov – Improving Methods of Tests and Diagnostics of Wagons: Compiled Scientific Papers*. Is. 2, ed. A. A. Bityutskiy; Wagon Building Engineering Centre. St. Petersburg, OM-Press, 2007. Pp. 90-100.

2. Galov V. V. Raschet protsessov razogreva zatverdevayushchikh gruzov pri slive iz zeleznodorozhnoy tsisterny [Calculation of Processes of Heating of Thickening Cargoes for Unloading from Cistern Car]. St. Petersburg, FGBOU VPO PGUPS, 2014. 14 p.

3. Ivanov V. A., Krylov G. V. & Rafikov L. G. *Eksploatatsiya energiticheskogo oborudovaniya gazoprovodov Zapadnoy Sibiri* [Operation of Power Equipment of Western Siberia Gas Pipelines]. Moscow, Nedra, 1987. 143 p.

4. Spetsializirovannyye tsisterny dlya perevozki opasnykh gruzov [Specialised Cisterns for Transportation of Dangerous Cargoes]. Moscow, MPS RF, Izdatelstvo standartov, 1993.

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич – д-р техн. наук, профессор, kteploteh@pgups.ru; ГАЛОВ Владимир Викторович – канд. техн. наук, доцент, v\_galov@hotmail.com; \*КОМИССАРОВ Сергей Борисович – аспирант, s.b.komissarov@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).