

РАЗРАБОТКА И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОТОГРЕВА ДОННОГО КЛАПАНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Нигматуллина Л.А., Щипакин А.А.

*Ульяновский институт гражданской авиации имени главного Маршала авиации Б.П. Бугаева,
Ульяновск*

Ключевые слова: железнодорожная цистерна, донный клапан, обогрев, переносное устройство, теплообмен, теплопотери, выхлопные газы.

Аннотация. В статье исследуется актуальная проблема сокращения времени слива нефтепродуктов из вагонов-цистерн в зимний период, связанная с замерзанием донного клапана нижнего сливного прибора железнодорожных цистерн. Целью работы является разработка мобильного, безопасного и эффективного технического решения для обогрева донного клапана на необорудованных сливных эстакадах. Методология включает анализ существующих стационарных и переносных технологий обогрева, инженерное проектирование устройства на основе унифицированной присоединительной головки и комплексный теплотехнический расчет для обоснования ключевых параметров. Научная новизна заключается в предложении конструкции, использующей отработавшие газы двигателя внутреннего сгорания транспортного средства в качестве мобильного источника тепла, и в теплофизическом обосновании оптимальных параметров системы подвода тепла к присоединительной головке с помощью гибкого трубопровода. В результате проведенных на основе разработанной математической модели расчетов установлено, что применение термостойкого силиконового рукава длиной 5-10 м позволяет доставить к донному клапану теплоноситель с эффективной температурой 66-85°C при температуре окружающей среды -10°C, что обеспечивает его надежный обогрев. Сделан вывод о высокой практической значимости устройства для минимизации простоя цистерн и повышения безопасности технологических операций на сливных эстакадах.

DEVELOPMENT AND THERMAL ANALYSIS OF A MOBILE DEVICE FOR HEATING THE BOTTOM VALVE OF A RAILROAD TANK CARS IN WINTER CONDITIONS

Nigmatullina L.A., Shchipakin A.A.

Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Air Marshal B.P. Bugaeva, Ulyanovsk

Keywords: railway tank car, bottom valve, heating, portable device, heat exchange, heat loss, exhaust gases.

Abstract. This article examines the pressing issue of reducing the time it takes to drain petroleum products from tank cars during the winter, which is associated with freezing of the bottom valve of the lower discharge device of railway tank cars. The goal of the study is to develop a mobile, safe, and effective technical solution for thawing the bottom valve on unequipped discharge racks. The methodology includes an analysis of existing stationary and portable thawing technologies, engineering design of a device based on a standardized connection head, and a comprehensive thermal engineering calculation to substantiate key parameters. The scientific novelty lies in the proposed design using exhaust gases from a vehicle's internal combustion engine as a mobile heat source and in the thermophysical justification of the optimal parameters of a heat supply system to the connection head using a flexible pipeline. Calculations based on the developed mathematical model revealed that the use of a heat-resistant silicone hose 5-10 meters long allows for the delivery of coolant with an effective temperature of 66-85°C to the bottom valve at an ambient temperature of -10°C, ensuring reliable heating. This study concluded that the device has significant practical value for minimizing tank downtime and improving the safety of operations at discharge racks.

Введение

Эффективность и бесперебойность работы логистических цепочек поставок нефтепродуктов напрямую зависят от скорости выполнения погрузо-разгрузочных операций. Слив светлых нефтепродуктов (бензинов, дизельного топлива, керосинов) из железнодорожных цистерн стандартно осуществляется через донный клапан (ДК) нижнего сливного прибора [1]. В зимний период при отрицательных температурах окружающей среды

свободная вода, присутствующая в нефтепродуктах в виде эмульсии, может кристаллизоваться в механизме ДК, блокируя его открытие [2].

Возникающая проблема приводит к значительным технологическим и экономическим потерям: вынужденному простоя цистерн, необходимости применения менее безопасного резервного верхнего слива или использованию трудоемких методов обогрева, основанных на использовании стационарных источников тепла [3].

Для крупных нефтеналивных терминалов простои парка цистерн исчисляются сотнями тысяч рублей в сутки. Таким образом, задача оперативного и безопасного восстановления работоспособности ДК является важной для обеспечения бесперебойных перевозок нефтепродуктов и минимизации эксплуатационных рисков.

Целью настоящего исследования является разработка мобильного устройства для обогрева ДК, не требующего стационарных источников энергии, и теплотехническое обоснование его ключевых параметров.

Для достижения цели были последовательно решены следующие задачи:

- 1) проведен сравнительный анализ существующих технологий обогрева;
- 2) разработана конструкция переносного устройства на базе серийно выпускаемого оборудования;
- 3) выполнено математическое моделирование процесса теплообмена в гибком трубопроводе для выбора оптимальных материала и длины рукава.

Анализ существующих методов обогрева

На сегодняшний день в промышленности применяется ряд технологий [4, 5], направленных на решение проблемы замерзания сливной арматуры. Их обзор и сравнительный анализ представлен в таблице 1.

Табл. 1. Сравнительный анализ методов обогрева донного клапана

Метод обогрева	Принцип действия	Преимущества	Недостатки	Применимость на необорудованных эстакадах
Открытый пар	Подача острого пара в сливной патрубок	Высокая скорость нагрева	Большие теплопотери, риск коррозии, необходимость в котельной и паропроводах	Невозможна
Переносные паровые подогреватели	Введение в цистерну змеевиков с паром	Относительная мобильность	Зависимость от стационарного источника пара, сложность работы, риск протечек	Ограничена
Циркуляционный подогрев	Прокачка горячего нефтепродукта по замкнутому контуру	Безопасен для качества продукта, эффективен	Требует дополнительной емкости, насосов и логистики, длительный процесс	Затруднена
Электро-индуктивный нагрев	Бесконтактный нагрев металла клапана переменным магнитным полем	Высокая локальная эффективность, автоматизация	Очень высокая стоимость оборудования, большие энергозатраты, искроопасность	Невозможна
Тепловые излучатели (ИК-пушки)	Инфракрасный нагрев снаружи	Мобильность, простота	Низкий КПД из-за нагрева всей конструкции, пожароопасность, зависимость от сети	Возможна, но неэффективна

Как следует из анализа, большинство технологий либо требуют сложной стационарной инфраструктуры, либо обладают низкой эффективностью и безопасностью при использовании в полевых условиях. Таким образом, существует устойчивая потребность в мобильном, автономном и технологически простом решении.

Разработка конструкции переносного устройства обогрева

Для решения обозначенной проблемы авторами предложена конструкция переносного устройства обогрева донного клапана нижнего сливного прибора железнодорожной цистерны (рис. 1) [6].

Предлагаемое устройство позволит обеспечить абсолютную мобильность, автономность и низкую себестоимость при использовании. Работа устройства ограничена лишь необходимостью применения в рассматриваемом процессе транспортного средства, например, автоцистерны, поскольку основана на использовании тепла отработавших газов ДВС транспортного средства.

Предлагаемое устройство содержит корпус 1, выполненный на базе серийно выпускаемой промышленностью присоединительной головки нефтепродуктов (СНУ-5М), с возможностью фиксации к нижнему сливному прибору железнодорожной цистерны за счет зажимных крюков 2, управляемых воротками. Корпус 1 выполнен с отверстиями 3 для выхода отработавших газов двигателя внутреннего сгорания и снабжен Г-образным патрубком 4, имеющем на одном конце кольцообразные выступы 5 для соединения с гибким рукавом, а на другом – диффузор 6 для увеличения статического давления потока газов и равномерного его распределения по сечению нижнего сливного прибора железнодорожной цистерны. Также в корпусе 1 имеется дренажный патрубок с краном 7 для отвода талой воды (рис. 2).



Рис. 1. Переносное устройство обогрева донного клапана

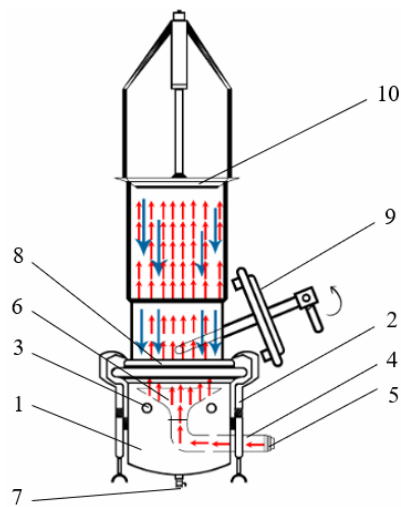


Рис. 2. Схема устройства обогрева донного клапана

Принцип работы устройства обогрева донного клапана нижнего сливного прибора железнодорожной цистерны заключается в следующем. Устройство фиксируют на торце патрубка нижнего сливного прибора 8 железнодорожной цистерны с предварительно откинутой крышкой 9 за счет зажимных крюков 2, управляемых воротками, после чего на кольцообразные выступы 5 Г-образного патрубка 4, вваренного в корпус 1 устройства, устанавливается гибкий рукав, второй конец которого надевается на выпускную трубу транспортного средства, например, автоцистерны.

Отработавшие газы двигателя внутреннего сгорания автоцистерны, проходя через гибкий рукав в корпус устройства обогрева донного клапана 10 через Г-образный патрубок 4 и диффузор 6 попадают непосредственно в тарельчатый клапан донного клапана 10 цистерны и обеспечивают за счет нагрева последнего превращение льда в воду и открытие донного

клапана 10. Скапливающийся конденсат удаляется через дренажный патрубок с краном 7, а отработавшие газы выходят через отверстия 3 на корпусе 1 устройства. Окончание процесса проверяют незначительным проворотом штанги сливного прибора.

Предлагаемое переносное устройство позволит при необходимости произвести отопление донного клапана нижнего сливного прибора железнодорожной цистерны на участках слива, не оборудованных специальным стационарным оборудованием.

Математическая модель и расчет теплопотерь в гибком рукаве

Эффективность работы устройства в значительной степени определяется возможностью доставить теплоноситель (отработанные газы ДВС) к клапану с минимальными потерями. Данная функция обеспечивается такими показателями гибкого трубопровода как материал и длина.

Для количественной оценки данных показателей была разработана математическая модель, основанная на уравнении теплового баланса. Температура газов на выходе из рукава определяется по формуле [7]:

$$t_g = (Q_n - Q_n) / (\rho \cdot c_p \cdot V), \quad (1)$$

где t_g – температура на выходе, °C; Q_n – начальное теплосодержание газов, Дж; Q_n – теплопотери в трубопроводе, Дж; ρ – плотность газов, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); V – объемный расход, м³/с.

Для обеспечения мобильности и надёжности подключения в качестве гибкого трубопровода выбран рукав с гофрированной поверхностью [8]. Такая конструкция обладает повышенной устойчивостью к деформациям изгиба без риска заломов в условиях ограниченного пространства сливной эстакады.

Для определения величины теплопотерь Q_n через стенки гофрированного рукава в окружающую среду была преобразована формула расчета стационарной теплопередачи через цилиндрическую стенку. Моделирование рассматриваемого процесса [7, 9-11] проводилось с учетом увеличения площади поверхности рукава вследствие гофрирования по разработанной зависимости для определения величины теплопотерь Q_n :

$$Q_g = (t_{гн} - t_0) [1 / (2\pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \ln(d_n / d_{гн})) + 1 / (k \cdot \alpha_n \cdot \pi \cdot d_n \cdot l)] \cdot \tau, \quad (2)$$

где $t_{гн}$ – средняя температура газов внутри трубопровода, °; t_0 – температура окружающего воздуха, °C; λ – коэффициент теплопроводности материала трубопровода, Вт/(м·°C); l – длина трубопровода, м; d_n , $d_{гн}$ – наружный и внутренний диаметры трубопровода, м; α_n – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности, Вт/(м²·°C); τ – время процесса, с; k – коэффициент гофрирования (безразмерная величина > 1, определялась по паспорту изделия).

Анализ результатов и выбор оптимальных параметров

В результате расчетов на модели был выбран оптимальный материал и определена оптимальная длина гибкого трубопровода.

Для проведения расчетов на модели были заданы исходные параметры, характерные для нормальной эксплуатации, в соответствии со справочными данными [7].

Анализ материалов, из которых изготавливаются рукава, показал, что термостойкие силикон и резина одновременно отвечают необходимым требованиям: прочность, устойчивость к высокой температуре выхлопа (до +300°C), морозостойкость (до -50°C), гибкость для мобильного использования, долговечность и химическая стойкость к выхлопным газам. Эти материалы являются серийно выпускаемыми, доступными и широко применяемыми в промышленности. Таким образом, при моделировании процесса были рассмотрены материалы рукава: термостойкий силикон ($\lambda \approx 0,2$ Вт/(м·°C)) и термостойкая резина ($\lambda \approx 0,15$ Вт/(м·°C)).

Температура газов на выходе (t_g) из рукава по результатам была принята в диапазоне от 60 до 90°C.

Температура окружающей среды (t_0): -10°C.

Расход выхлопных газов (V): 28 л/ч.

Длина рукава варьируется от 5 до 25 м.

Внутренний диаметр рукава: 50 мм.

Коэффициент гофрирования для стандартных гибких силиконовых и резиновых рукавов: $k = 1,8$.

Результаты расчетов температур выхлопных газов на выходе из рукава представлены в таблице 2.

Результаты величины теплотерь в рукаве приведены в таблице 3.

Табл. 2. Температуры выхлопных газов на выходе из рукава

Температура, °С	60	68	75	83	90
Материал рукавов					
Термостойкий силикон	59,38	66,25	72,72	79,68	85,54
Термостойкая резина	54,33	59,29	62,93	70,11	75,10

Табл. 3. Результаты величины теплотерь в рукаве

Величина теплотерь в рукаве, кДж	Длина рукава, м				
	5	10	15	20	25
Из термостойкого силикона	35	98	127,5	186	250
Из термостойкой резины	70	156	265,5	372	500

Таким образом, расчеты подтвердили предположение, что с увеличением длины гибкого рукава наблюдается увеличение теплотерь и снижение температуры теплоносителя.

Требуемая температура на выходе (70-80°C) напрямую определяет предельно допустимый уровень теплотерь в рукаве. Расчёты показали, что для выбранного силиконового рукава это условие выполняется при длине 5-10 м, когда фактические потери не превышают 35-100 кДж. Таким образом, критерий эффективности ($t \geq 70^\circ\text{C}$) является не только требованием к процессу обогрева, но и количественным ограничением на величину теплотерь, которое легло в основу оптимизации длины рукава. Данные параметры гарантируют плавление ледяной пробки без риска термической деформации полимерных уплотнительных элементов клапана.

Рукав из термостойкого силикона по сравнению с рукавом из резины, обладая более низкой теплопроводностью, при одинаковых длинах обеспечивает температуру газов на выходе в требуемом температурном диапазоне на 9-10°C выше.

Результаты расчетов показывают, что для оперативного применения оптимальным и технически достаточным является использование рукава длиной 7 ± 2 метра. Таким образом, длину рукава целесообразно выбирать в диапазоне от 5 до 10 м.

Данные параметры позволяют восстановить работоспособность донного клапана в течение 5-15 минут в стандартных зимних условиях.

Заключение

На основе анализа технико-экономических недостатков существующих стационарных систем обогрева донного клапана нижнего сливного прибора железнодорожных цистерн обоснована необходимость и предложена концепция мобильного устройства, использующего вторичный энергоресурс – тепло отработавших газов ДВС транспортных средств.

Разработана конструктивная схема устройства на базе унифицированной сливной головки СНУ-5М, предусматривающая безопасное подключение, равномерное распределение горячего потока и отвод конденсата.

Методом математического моделирования процесса теплопередачи в гибком гофрированном рукаве установлены количественные зависимости снижения температуры теплоносителя от длины и материала рукава. Доказано, что применение термостойкого силиконового рукава длиной 5-10 м является оптимальным, обеспечивая доставку газа с эффективной температурой, достаточной для плавления ледяной пробки.

Основное практическое преимущество разработки – возможность ее оперативного применения на любых пунктах слива нефтепродуктов из железнодорожных цистерн без капитальных затрат на стационарную инфраструктуру. Внедрение устройства позволит существенно сократить простои железнодорожного подвижного состава, минимизировать риски, связанные с использованием небезопасных методов обогрева, и повысить общую надежность технологической операции слива нефтепродуктов в зимний период.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка системы термоконтроля и автоматического отключения устройства, исследование влияния состава и влажности выхлопных газов на процесс обогрева, а также адаптация конструкции для работы с цистернами различных моделей и типов сливных приборов.

Список литературы

1. Горобченко С.Л., Ковалёв Д.А., Теппоев А.В., Беженарь В.Н., Соколова В.А. Современные подходы к донной арматуре слива железнодорожных цистерн // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Вып. 5. – С. 396-405. – doi.org/10.24412/2071-6168-2024-5-396-405.
2. Лещенок А.А., Тоноян А.А., Москаленко А.Ю., Чернышов М.В. Технология слива с железнодорожных цистерн с неисправным донным клапаном тяжелых нефтепродуктов // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2021. Сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2021. – Т. 4. – С. 132-136.
3. Кузьмин О.С., Луценко А.Н., Куликова Е.С., Антонычева Е.А. Альтернативный подход к увеличению надежности сливных приборов железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов и снижению рисков их несанкционированных разливов в пути следования // Транспортное машиностроение. – 2025. – №7(43). – С. 63-71. – doi.org/10.30987/2782-5957-2025-7-63-71.
4. Копылов Л.А., Чечельницкий И.А., Козырев И.И. Безопасное извлечение авиатоплива из вагон-цистерн при низких температурах // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. – 2021. – №3(21). – С. 40-43.
5. Куликова Е.С., Кузьмин О.С. Разработка и применение устройства обогрева донного клапана железнодорожных цистерн при операциях слива нефтепродуктов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2022. – №3(129). – С. 57-61. – doi.org/10.33285/1999-6934-2022-3(129)-57-61.
6. Патент №237335 РФ. Переносное устройство обогрева донного клапана железнодорожной цистерны / Л.А. Нигматуллина, А.А. Щипакин, И.Г. Кушнаренко, О.С. Воронова. – Заявка №2025112774 от 15.05.2025; опубл. 22.09.2025, Бюл. № 27.
7. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Физматлит, 2006. – 720 с.
8. Постнов В.И., Сатдинов Р.А., Макрушин К.В., Иванов М.С. Вопросы конструктивной и технологической обработки гибких трубопроводов из полимерных композиционных материалов систем кондиционирования воздуха // Труды ВИАМ. – 2021. – №1(95). – С. 66-76. – doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-1-66-76.
9. Белл С.С., Ерохов В.И. Математическая модель процессов теплообмена в системе выпуска отработавших газов бензинового двигателя // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 1, №1(15). – С. 37-41.
10. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах – М.: Машиностроение, 1990. – 206 с.
11. Деменок С.Л. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах и каналах: монография. – СПб.: Н-Пром Бюро, 2012. – 304 с.

References

1. Gorobchenko, S.L., Kovalev, D.A., Tepoev, A.V., Bezhenar, V.N., Sokolova, V.A. Modern Approaches to the Bottom Drainage Fittings of Railway Tank Cars // News of TulSU. Technical sciences. 2024, iss. 5, pp. 396-405. doi.org/10.24412/2071-6168-2024-5-396-405.
2. Leshchenok A.A., Tonoyan A.A., Moskalenko A.Yu., Chernyshov M.V. Technology of unloading heavy oil products from railway tank cars with a faulty bottom valve // Generation of the Future: Young Scientists' View – 2021. Collection of scientific articles of the 10th International Youth Scientific Conference. – Kursk: SWSU, 2021. – Vol. 4. – P. 132-136.
3. Kuzmin O.S., Lutsenko A.N., Kulikova E.S., Antonycheva E.A. Alternative approach to increasing the reliability of drain devices of railway tank cars for the transportation of petroleum products and reducing the risks of their unauthorized spills along the way // Transport engineering. 2025, no. 7(43), pp. 63-71. doi.org/10.30987/2782-5957-2025-7-63-71.
4. Kopylov L.A., Chechelitsky I.A., Kozyrev I.I. Safe extraction of aviation fuel from tank cars at low temperatures // Scientific problems of logistics of the Armed Forces of the Russian Federation. 2021, no. 3(21), pp. 40-43.
5. Kulikova E.S., Kuzmin O.S. Development and application of a device for heating the bottom valve of railway tank cars during oil product discharge operations // Equipment and technologies for the oil and gas complex. 2022, no. 3(129), pp. 57-61. doi.org/10.33285/1999-6934-2022-3(129)-57-61.

6. Patent No. 237335 RU. Portable device for heating the bottom valve of a railway tank car / L.A. Nigmatullina, A.A. Shchipakin, I.G. Kushnarenko, O.S. Voronova. – Appl. No. 2025112774 from 15.05.2025; publ. 22.09.2025, Bul. No. 27.
7. Vargaftik N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. – M.: Fizmatlit, 2006. – 720 p.
8. Postnov V.I., Satdinov R.A., Makrushin K.V., Ivanov M.S. Issues of design and technological development of flexible pipelines made of polymer composite materials for air conditioning systems // Proceedings of VIAM. 2021, no. 1(95), pp. 66-76. doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-1-66-76.
9. Bell S.S., Erokhov V.I. Mathematical model of heat exchange processes in the exhaust system of a gasoline engine // Bulletin of MSTU MAMI. 2013, vol. 1, no. 1(15), pp. 37-41.
10. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels – M.: Mechanical Engineering, 1990. – 206 p.
11. Demenok S.L. Heat transfer and hydraulic resistance in pipes and channels: monograph. – SPb.: N-Prom Bureau, 2012. – 304 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Нигматуллина Лилия Ауфатовна – старший преподаватель кафедры авиатопливообеспечения	Nigmatullina Liliya Aufatovna – senior lecturer of the Department of aviation fuel supply
Щипакин Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения	Shchipakin Aleksey Anatolyevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of aviation fuel supply
lily-nig@yandex.ru	

Получена 20.01.2026