УДК 656.225.073.437:662.75 DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_169

В. И. Моисеев, А. В. Жебанов

РАЗОГРЕВ ЗАСТЫВШИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ВЫГРУЗКЕ ИЗ ЦИСТЕРН РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Тематика статьи обусловлена необходимостью организации перевозок застывающих наливных грузов на территории Российской Федерации при отрицательных температурах. К таким грузам можно отнести котельные и флотские мазуты, крекинг-остатки, тяжелые нефтяные масла, гудроны и нефтебитумы и др. Рассматривается способ, обеспечивающий создание первичных каналов в застывшей массе нефтепродукта с возможностью использования как пароразогревающей системы, так и электроразогревающей системы, оборудованных линейными нагревательными элементами. Устройство обеспечивает быстрый размыв затвердевшей фракции, проводимый практически одновременно с выгрузкой. Предлагаемые мероприятия, направленные на повышение устойчивости движения вагона-цистерны или автомобильной цистерны, а также снижение затрат времени и тепловой энергии при выгрузке застывающих наливных грузов, легко осуществимы.

Ключевые слова: вагон-цистерна, автомобильная цистерна, транспортировка застывающих грузов, разогрев вязких грузов, выгрузка при отрицательных температурах.

Для цитирования: Моисеев, В. И. Разогрев застывших нефтепродуктов при выгрузке из цистерн различного назначения в зимних условиях / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 169–176. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_169.

Введение

В Российской Федерации, с её холодным континентальным климатом, продолжительным осенне-зимним периодом, который в некоторых регионах страны составляет от 6 до 8 месяцев в году, большими дальностями перевозок, была и остается проблема доставки застывающих наливных грузов (ЗНГ).

К ЗНГ относятся котельные и флотские мазуты, крекинг-остатки, тяжелые нефтяные масла, гудроны и нефтебитумы и др. Продукты заливают в котел вагона-цистерны или автомобиля-цистерны при высокой температуре и низкой вязкости. За типичное для России продолжительное время транспортирования при низких температурах воздуха ЗНГ охлаждаются и переходят в высоковязкое состояние, резко затрудняющее их выгрузку, проводимую, как правило, сливом самотеком [1, 2].

Низкотемпературные свойства ЗНГ обуславливают особенности их доставки. Если мазуты перевозят на большие расстояния в вагонах-цистернах и автомобилях-цистернах, то значительную долю технических масел доставляют в таре, что существенно усложняет логистику их перевозок. Масла теряют кондиционность при обводнении, и это делает невозможным их разогрев открытым паром, проводимом при выгрузке мазутов. Затруднен и электроразогрев застывших масел из-за возможности образования нагара на греющих элементах. При рециркуляционном способе разогрева ЗНГ часть продукта, идентичного находящемуся в котле вагона-цистерны, разогревается на наземной установке до высокой температуры и подается горячей жидкой струей в виде теплоносителя, создаваемого гидромонитором на застывшую массу ЗНГ, вызывая её размыв. Гидромонитор заводится в котел вагона-цистерны или автомобиля-цистерны через верхний наливной люк [3]. При этом технические трудности возникают при размыве фракции ЗНГ, застывшей в больших количествах на днищах котла, наиболее удаленных от наливного люка. Кинетическая энергия струи часто оказывается недостаточной для быстрого размыва слоя затвердевшей фракции [4–8].

Основная часть

На начальной стадии перевозки, когда ЗНГ ещё сохраняют высокую температуру и подвижность, тоже встречаются технические трудности.

Все жидкие нефтепродукты имеют большое тепловое расширение, возникающее с ростом температуры. Поэтому для предотвращения разрывов обечайки котла вагона-цистерны, или автомобиля-цистерны, котел в штатных условиях эксплуатации заполняется лишь частично, приблизительно на 80–96 % от своей вместимости (в зависимости от типа наливного груза). Но очень часто встречаются внештатные ситуации, когда его заполняют с большим недоливом (~50 %). Следовательно, жидкий ЗНГ внутри котла всегда имеет

свободную поверхность. Тогда при движении вагона-цистерны или автомобиля-цистерны внутри котла происходят колебания жидкости, а на её поверхности возникают волны. Эти движения крайне нежелательны при эксплуатации вагонов-цистерн и просто очень опасны при перевозках ЗНГ в автомобилях-цистернах.

Внутренние движения жидкости в котлах цистерны резко снижают устойчивость её движения. Они зачастую ведут к аварийным ситуациям, связанным с опрокидыванием транспортного средства (особенно большегрузных автомобилей-цистерн), проливам больших количеств нефтепродукта, экологическим загрязнениям окружающей среды и возникновениям пожаров.

Для повышения эффективности перевозок ЗНГ в холодный осенне-зимний период в автомобилях-цистернах или железнодорожных вагонах-цистернах предлагаются два мероприятия:

– для повышения устойчивости движения провести подготовку ЗНГ к перевозке в частично заполненном вагоне-цистерне или автомобиле-цистерне;

– для снижения затрат ресурсов (прежде всего времени и тепловой энергии) при выгрузке использовать двухэтапный способ разогрева и размыва высоковязкой или даже затвердевшей фракции ЗНГ.

Первое мероприятие сводится к следующему. Все мазуты и масла имеют малые значения коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{ЗНГ}$~0,03Н/м, при этом их вязкость $\nu_{ЗНГ}$ резко возрастает с понижением температуры.

Это идеальные условия для получения нефтепродукта в пористом, воздухонасыщенном состоянии, создаваемом барботированием холодного воздуха мелкими пузырями через массу ЗНГ в частично заполненном котле вагона-цистерны или автомобиля-цистерны.

Среда в пористом, воздухонасыщенном состоянии называется «дисперсоидом». В данном случае это будет мазутный или масловый дисперсоид (МД), твердый при сравнительно низких температурах, но очень легко плавящийся при нагревании. Примером дисперсоида является выпускаемый пищевой промышленностью пористый шоколад.

Основными параметрами МД являются его кратность и дисперсность. Поясним термины. В заданном объеме дисперсоида $V_д$ содержится некоторый объем воздуха $V_в$ и жидкости $V_ж$ (мазута), пошедшей на его образование. Кратность МД, как параметр, определяется отношением:

$$\gamma = \frac{V_ж + V_в}{V_ж}.$$

Высокократными дисперсоидами ($\gamma > 20$) являются пены, а вот предлагаемый МД должен иметь низкую кратность ($\gamma \approx 2…4$).

Даже при такой низкой кратности МД имеет существенно меньшие плотность и теплопроводность, чем жидкие мазуты и технические масла, перевозимые в цистерне. Теплопроводность МД можно оценить по формуле Манегольда:

$$\lambda_{мд} = \frac{2}{3}\frac{\lambda_ж}{\gamma} + \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)\lambda_в . \quad (1)$$

Мазуты и масла имеют малую теплопроводность $\lambda_ж \approx 0{,}12…0{,}16$ Вт/м²·°С, воздух ещё меньшую: $\lambda_в = 0{,}025$ Вт/м²·°С. Оценка по формуле (1) показывает, что теплопроводность МД $\lambda_{МД}$ = = 0,05…0,07 Вт/м²·°С оказывается сравнимой с теплопроводностью стекловолокна и стекловаты, которые идут на изготовление вагонов-цистерн-термосов $\lambda = 0{,}045…0{,}065$ Вт/м²·°С

Дисперсность МД определяют средним радиусом r воздушных пузырьков в этой среде. Коллективная скорость подъема пузырьков в МД зависит от вязкости $\nu_{ЗНГ}$ жидкости (мазута, масла) и кратности γ МД [9]:

$$u = \frac{2r^2 g}{9\nu_{ЗНГ}}\left(1 - \gamma^{-0{,}33}\right). \quad (2)$$

Здесь g – ускорение свободного падения м/с². Котельные мазуты и масла имеют, при температурах $T \approx 40$ °С, вязкость $\nu_{ЗНГ}$~ (5…6) 10^{-4} м²/с. Из (2) можно определить, что пузырьки воздуха диаметром $2r = 10^{-3}$ м будут подниматься со скоростью u ≈1,2 мм/мин, а при температурах $T < 30$ °С скорость их подъема вообще становится пренебрежимо малой. При этом МД становится устойчивой,

псевдо пластической средой, способной держаться на свободной поверхности жидкости в котле вагона-цистерны или автомобиля-цистерны и гасить колебания и волны, понижающие устойчивость движения транспортного средства, и играть роль тепловой изоляции для перевозимого МД.

Второе мероприятие сводится к ускоренному способу размыва высоковязкой или даже затвердевшей фракции ЗНГ, проводимому в два этапа. На первом этапе в толще застывшей фракции ЗНГ с помощью линейных нагревателей, установленных вдоль стенок обечайки и днищ котла вагона-цистерны (или автомобиля-цистерны), протапливаются каналы, ведущие к нижнему сливному прибору.

Через эти каналы прокачивается горячий жидкий теплоноситель от наземной установки, обеспечивающий размыв и расширение каналов по всей их длине, вплоть до полного разжижения всей затвердевшей фракции ЗНГ.

Рассмотрим динамику тепловых процессов на примере выгрузки котельных мазутов М100, М200 и тяжелых нефтяных масел (солидолов).

Для создания первичных каналов в застывшей массе нефтепродукта возможно использование как пароразогревающей системы (ПРС), так и электроразогревающей системы (ЭРС) с линейными нагревательными элементами. Принципиальной разницы между этими системами нет, и мы ограничимся вариантом использования ПРС, показанном на рис. 1.

Подобное предложение было рассмотрено [6–8], далее рассмотрим принципиальные отличия. Предложение сводится к следующему. На внутренней поверхности стенок котла вагона-цистерны жестко крепятся тонкие трубы *1* радиусом $R_т$ (стандартные водопроводные трубы диаметром 1 дюйм) для подачи пара и трубы *2* большего диаметра (пять дюймов) для подачи теплоносителя от системы, используемой при рециркуляционном способе выгрузки ЗНГ. В верхней части котла вагона-цистерны или автомобиля-цистерны трубы *1* и трубы *2* объединены по монтажной схеме «труба в трубе».

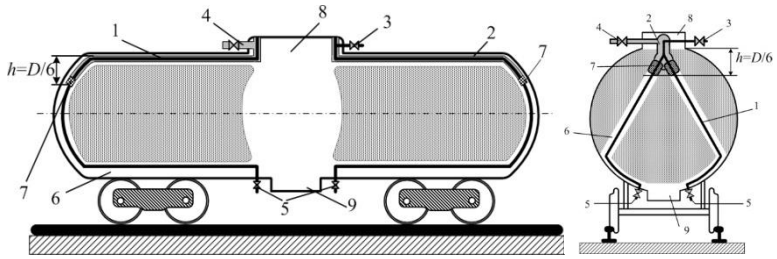


Рис. 1. Устройство двухэтапного размыва застывшей фракции ЗНГ:
1 – трубы для подачи пара; *2* – трубы для подачи теплоносителя;
3, 4 – входные патрубки к трубам *1* и *2*; *5* – штуцера для сброса остатков пара и слива конденсата;
6 – каналы в массе застывшей фракции; *7* – рассеивающие сопла для подачи теплоносителя
в протопленные каналы *6*; *8* – верхний загрузочный люк; *9* – нижний сливной прибор

В массе ЗНГ трубами *1* протапливается канал с увеличивающимся по мере работы устройства радиусом $r(t) > R_т$. Греющая труба *1* остается в центре канала. Проходное сечение канала, с разогретым нефтепродуктом, с малой вязкостью, имеет толщину $\delta = r(t) - R_т$, увеличивающуюся со временем разогрева. В верхней части котла вагона-цистерны трубы *1* проходят внутри труб *2*, имеющих больший диаметр. У днищ котла вагона-цистерны на расстоянии $h = 0{,}5…0{,}8$ м от верхней поверхности его обечайки каждая из труб *2* оканчивается соплом *4*, обеспечивающем подачу теплоносителя струей, направленной вдоль трубы *1*, т.е. в зону маловязкого продукта внутри котла. Это ведет к образованию каналов *6* в массиве затвердевшего ЗНГ и последующему размыву их стенок с увеличением проходного сечения каналов.

Расширяющиеся каналы *6* проходят рядом с днищами котла и его обечайкой прямо к нижнему сливному патрубку *9*. Обе системы труб *1* и *2* имеют входные патрубки *3* и *4* на наружной поверхности котла вагона-цистерны, у верхнего наливного люка *8*. Трубы *1* ПРС оканчиваются штуцерами *5* для сброса остатков пара и конденсата.

Остающийся свободным доступ к верхнему, загрузочному люку *8* и нижнему сливному патрубку *9* позволяет размывать затвердевшую массу ЗНГ и стандартными методами, применяемыми при рециркуляционном способе слива, т.е. струей гидромонитора, формируемой в центре котла.

Таким образом, размыв затвердевшего мазута или солидола можно осуществить одновременно в центре котла вагона-цистерны или автомобиля-цистерны у его днищ и в нижней части, около сливного патрубка.

По специально разработанной программе для ЭВМ было рассчитано изменение со временем диаметра δ размываемого канала *6*.

На рис. 2 показаны результаты расчетов, характеризующие увеличение диаметра δ проплавляемых каналов *6*. Температура наружного воздуха и исходная температура ЗНГ задавались очень низкими – минус 30 ºС.

Ход кривых показывает, что при пропускании пара с температурой плюс 120 ºС через трубы ПРС в течение 1200 секунд разогревается, становится маловязким и сливается слой ЗНГ около трубы *1* толщиной $\delta \approx 50$ мм. Около трубы *1* образуется и канал *6*, а затем он размывается теплоносителем (горячим ЗНГ), подаваемым, например, установкой «Поток-175ГМ».

Скорость подачи размывающего ЗНГ $\overline{\omega}$ находилась из уравнения, описывающего теплоотдачу от турбулентного потока стенкам канала [9]:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\varsigma}{8}\mathrm{Re}\cdot f(\mathrm{Pe})\cdot \tag{3}$$

В формуле использованы отмеченные в табл. 1 безразмерные критерии теплового и динамического подобия и коэффициенты, а также функция Пекле $f(\mathrm{Pe})$ − зависящая от значений критериев Прандтля и Рейнольдса. Её можно вычислить по данным, указанным в табл. 2. Указанные величины содержат физические характеристики нефтепродукта: ν – кинематическую вязкость, м^2/с; a – температуропроводность, м^2/с; λ – теплопроводность, Вт/мºС; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м$^{2.o}$С, $\overline{\omega}$ – скорость течения нефтепродукта по каналу, м/с, и δ – диаметр канала, м [9, 10].

Таблица 1

Безразмерные критерии подобия и коэффициент Блазиуса

Рейнольдса	$\mathrm{Re} = \dfrac{\overline{\omega}\delta}{\nu_{\text{ЗНГ}}}$	Нуссельта	$\mathrm{Nu} = \dfrac{\alpha\delta}{\lambda}$
Прандтля	$\mathrm{Pr} = \dfrac{\nu_{\text{ЗНГ}}}{a}$	Блазиуса	$\varsigma = 0{,}316\,\mathrm{Re}^{-0,25}$ при $10^4 < \mathrm{Re} < 10^5$
Пекле	$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re}\cdot\mathrm{Pr} = \dfrac{\overline{\omega}\delta}{a}$		

Таблица 2

Численные значения функции $f(\mathrm{Pe})$

Re	Pr = 5	Pe·10^{-4}	Pr = 10	Pr = 15
1·10^4	1,78	1,78	2,1	2,4
1·10^6	2,30	230	310	410

Так как центральная часть канала *6* занята трубой ПРС, эта труба считается тонкой, то вводится допущение, что в начале размыва $r \approx \delta$. При этом:

$$\mathrm{Re} = 2\frac{\overline{\omega}\delta}{\nu_{\text{ЗНГ}}}\cdot \tag{4}$$

Числа Прандтля Pr = 5–15 в табл. 2 отвечают температурам ЗНГ T~120–90 ºС.

При этих температурах кинематическая вязкость мазутов М100, М200 составляет порядка ν = = (15..20)·10^{-6} м^2/с, что при толщине канала $\delta = 5\cdot10^{-2}$м обеспечивает значение Рейнольдса $\mathrm{Re} \approx 6\cdot10^4$, попадающее в интервал, отмеченный в табл. 1. Известно [10], что движение жидкости по трубе проходит в турбулентном режиме при Re > 2300, в нашем случае это условие заведомо выполняется.

Расчеты по формуле (4) с учетом определения числа Рейнольдса Re, показывают, что прокачку размывающего продукта необходимо проводить со скоростью не меньшей $\overline{\omega} = 10$ м/с.

Формально, перенос теплоты в канале *6* можно описать, используя модель «эквивалентной теплопроводности», предложенную академиком М. А. Михеевым [11]. В её основе лежит уравнение Фурье для плотности теплового потока q Вт/м^2:

$$q = \frac{\varepsilon_к\lambda}{\delta}\Delta T\cdot \tag{5}$$

Здесь ΔT – разность температур между наружной стенкой нагревающей трубы *1* и внутренней стенкой канала *6*, $\varepsilon_к$ – безразмерный «коэффициент конвекции» [11]. В рамках этой модели эта величина показывает во сколько раз эквивалентная теплопроводность движущейся жидкости $\lambda_{экв}$ больше, чем её молекулярная теплопроводность λ:

$$\varepsilon_к = \lambda_{экв} / \lambda \ . \qquad (6)$$

Модель применялась при рассмотрении начальных стадий размыва, когда диаметр канала $\delta < 10$ см.

Нижняя кривая на рис. 2 показывает изменение со временем коэффициента конвекции $\varepsilon_к$. Можно ввести допущение, что $\varepsilon_к \approx 50$.

При указанных параметрах греющих и размывающих элементов увеличение массы тары вагона-цистерны не превысит 300 кг, а её полезная вместимость уменьшается всего на 0,07 м^3. Суммарная масса сопел 4 (рис. 1) считалась равной 5 кг.

Из рис. 2 видно, что при числах Нуссельта Nu = 1200–2000 выгрузку ЗНГ можно завершить через 2–2,5 часа, так как диаметры каналов *6* достигают при этом $\delta \approx 0{,}5$ м. Эти значения превышают наблюдаемую в практике эксплуатации подвижного состава толщину затвердевшего слоя ЗНГ.

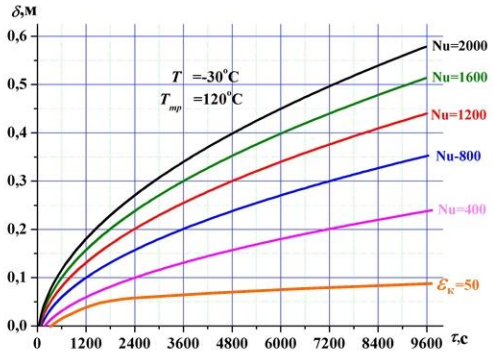
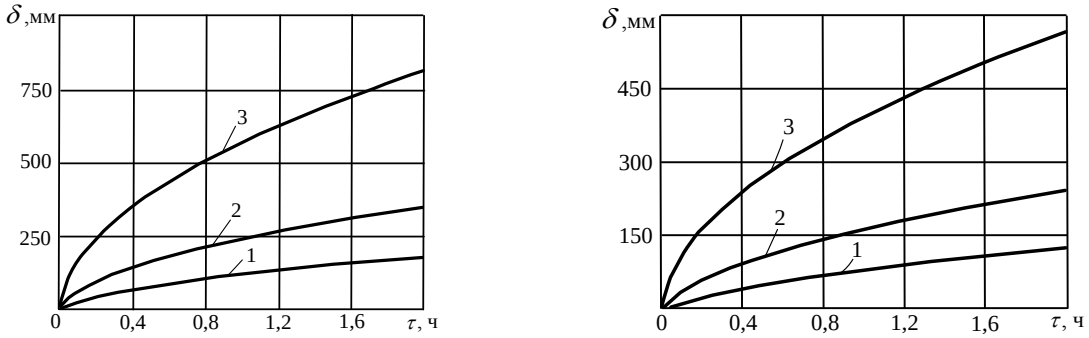


Рис. 2. Рост диаметра *δ* размываемого канала в затвердевшем мазуте М100 на первом (τ < 20мин) и втором (τ > 20 мин) этапах работы устройства

На рис. 3 показаны результаты расчетов по росту диаметра канала *6* со временем размыва, осуществляемого струей теплоносителя, имеющего различное удельное теплосодержание $Q = C_ж \Delta T$ при различной теплопроводности λ затвердевшей фракции.

Кривая *1* отвечает условиям размыва МД, с кратностью $\gamma = 2{,}5$ и имеющего теплопроводность $\lambda = 0{,}03$ Вт/м²·°С. Кривая *2* характеризует размыв затвердевшего мазута М100, кривая *3* – размыв солидола.



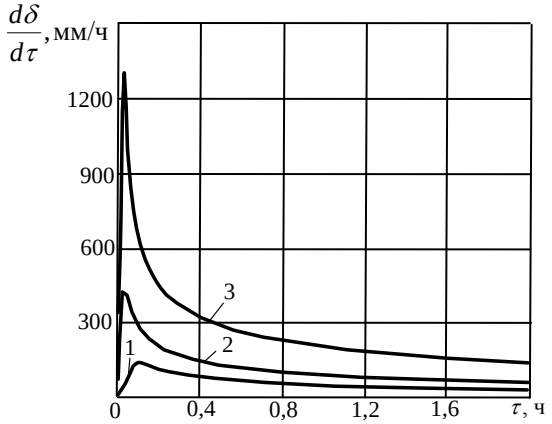
(*а*) Q = 200 кДж/кг (*б*) Q = 120 кДж/кг

1– λ = 0,03Вт/м·ºС; 2 – λ = 0,1Вт/ м·ºС; 3 – λ = 0,5Вт/ м·ºС

Рис. 3. Рост во времени диаметра размываемого канала δ в затвердевшей фракции ЗНГ при различных значениях теплопроводности среды λ и удельного теплосодержания теплоносителя Q

Время возрастания диаметра канала *6* до значений δ = 300 мм даже при сравнительно небольших температурах теплоносителя (ΔT = 100…160 ºС) не превосходит 2-х часов.

На рис. 4 показаны результаты расчета скорости движения фронта плавления при размыве канала *6* в застывшем ЗНГ у продуктов с различными значениями коэффициента теплопроводности λ. Кривая *1* характеризует скорость размыва МД, кривая *2* – размыва мазутов М100, с теплопроводностью $\lambda \approx 0{,}12$ Вт/м²·°С, а кривая *3* – скорость разжижения солидолов, с теплопроводностью $\lambda \approx 0{,}5$ Вт/м·^{0}С.



1 – λ = 0,03 Вт/м·°С; 2 – λ = 0,1 Вт/м·°С; 3 – λ = 0,5 Вт/м·°С

Рис. 4. Скорость движения фронта расплава ЗНГ в окрестностях горячей трубы ПРС при различных значениях теплопроводности ЗНГ
$T_{нагр.}$ = 90 ^{0}С, Q = 120кДж/кг

На начальных стадиях размыва (первые 3–5 мин), когда каналы *6* имеют ещё малый диаметр, скорость движения фронта плавления велика. Затем, с ростом проходного сечения канала *6* и снижения скорости течения жидкости в нем (расход жидкости через канал задавался постоянным) она снижается до 300–150 мм/час.

Коэффициент теплоотдачи от труб ПРС в окружающую среду определялся, исходя из критериального уравнения, применяемого в инженерных расчетах теплообменных аппаратов [12, 13]:

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}. \quad (7)$$

По этой формуле были найдены: коэффициент теплоотдачи от труб ПРС к ЗНГ на первом этапе работы устройства α = 2003 Вт/м^2·°С и коэффициент теплопередачи k = 1400 Вт/м^2·°С от теплоносителя в размываемую среду. Теплоноситель имел избыточную (относительно температуры плавления ЗНГ) температуру $T_ж$= 75 ^{0}С и скорость течения $\overline{\varpi}$ = 8 м/с. В этих размывах канала *6* скорость достигала $5 \cdot 10^{-2}$ м/с (см. рис. 4).

Выводы

Устройство обеспечивает быстрый размыв затвердевшей фракции ЗНГ, проводимый практически одновременно с выгрузкой. Отличается простотой и низкими затратами на изготовление и установку, дает очень малые изменения массы тары и вместимости котла вагона-цистерны или автомобиля-цистерны. Оно позволяет быстро удалять высоковязкую фракцию ЗНГ с торцов котла вагона-цистерны или автомобиля-цистерны, что является одним из недостатков в применяемых в настоящее время системах слива вязких жидкостей. Простое по исполнению устройство размыва ЗНГ может быть изготовлено и установлено на стадии планового ремонта вагона-цистерны или автомобиля-цистерны. При железнодорожных перевозках ЗНГ оно позволит перевозить вязкие продукты в зимний период в неспециализированных цистернах общего назначения, что дает большой экономический эффект.

Предлагаемые мероприятия, направленные на повышение устойчивости движения вагона-цистерны или автомобиля-цистерны, а также направленные на снижение затрат времени и тепловой энергии при выгрузке застывающих наливных грузов, легко осуществимы. Их можно внедрить на находящихся в эксплуатации средствах их перевозки. Оба не требуют больших капиталовложений и могут быть реализованы в условиях депо или автомобильного парка.

Список литературы

1 **Жебанов, А. В.** Каталитический разогрев вязких нефтепродуктов в котле вагона – цистерны /

References

1 **Zhebanov, A. V.** Catalytic heating of viscous petroleum products in the boiler of a tank car /

А. В. Жебанов, В. И. Моисеев // Наука и образование транспорту. – 2022. – № 1. – С. 45–48. – EDN EUKVOY.

2 **Моисеев, В. И.** Организация перевозок вагонами-цистернами застывающих нефтяных топлив с передачей по полевым трубопроводам в условиях низких температур / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов, Т. А. Комарова // Транспорт Урала. – 2021. – № 2(69). – С. 40–43. – ISSN 1815-9400.

3 **Колесников, А. А.** Параметрическая оптимизация конструкции на базе генетического алгоритма эволюционных вычислений цистерны для перевозки сжатых или сжиженных газов / А. А. Колесников, М. Ю. Сербиновский, В. Е. Доценко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2(86). – С. 22–28. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_22.

4 **Моисеев, В. И.** Оптимальные варианты перевозки застывающих темных и светлых нефтепродуктов в вагонах-цистернах / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов – 2021. – № 2(86). – С. 7–14. – EDN JXEBHB.

5 **Моисеев, В. И.** Расчет тепловой модели вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов // Известия Транссиба. – 2021. – № 1(45). – С. 85–95. – ISSN 2220-4245.

6 **Патент на полезную модель № 182602 U1 Российская Федерация, МПК B65D 88/00**. Цистерна для перевозки вязких продуктов : № 2018104341 : заявл. 05.02.2018 : опубл. 23.08.2018 / А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов, М. А. Паренюк, И. О. Ананников; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (СамГУПС). – EDN RKTDSU.

7 **Ворон, О. А.** Использование метода актуализации технических решений для создания модели функционального взаимодействия систем автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_86.

8 **Ворон, О. А.** Аспекты совершенствования железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов в составе непрерывной холодильной цепи / О. А. Ворон, И. Г. Морчиладзе // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 1(50). – С. 40–45. – ISSN 1994-831X.

9 **Коган, В. Б.** Теоретические основы типовых процессов химической технологии / В. Б. Коган. – Ленинград : Химия, 1977. – 592 с.

10 **Повх, И. Л.** Техническая гидромеханика / И. В. Повх. – Ленинград : Машиностроение. – 1976. – 502 с.

A. V. Zhebanov, V. I. Moiseev // Science and education for transport. – 2022. – No. 1. – P. 45–48. – EDN EUKVOY.

2 **Moiseev, V. I.** Organization of transportation by tank cars of solidified petroleum fuels with transmission through field pipelines at low temperatures / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov, T. A. Komarova // Transport of the Urals. – 2021. – No. 2(69). – P. 40–43. – ISSN 1815-9400.

3 **Kolesnikov, A. A.** Parametric optimization of the design based on the genetic algorithm of evolutionary calculations of a tank for the transportation of compressed or liquefied gases / A. A. Kolesnikov, M. Y. Serbinovsky, V. E. Dotsenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2(86). – P. 22–28. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_22.

4 **Moiseev, V. I.** Optimal options for transportation of solidified dark and light oil products in tank cars / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov // 2021. – No. 2(86). – P. 7–14. – EDN JXEBHB.

5 **Moiseev, V. I.** Calculation of the thermal model of a tank car for the transportation of petroleum products / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov // Izvestiya Transsib. – 2021. – No. 1(45). – P. 85–95. – ISSN 2220-4245.

6 **Utility model Patent No. 182602 U1 Russian Federation, IPC B65D 88/00.** Tank for the transportation of viscous products : No. 2018104341 : application 05.02.2018 : publ. 23.08.2018 / A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov, M. A. Parenyuk, I. O. Anannikov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State University of Railways" (SAMGUPS). – EDN RKTDSU.

7 **Voron, O. A.** Using the method of updating technical solutions to create a model of functional interaction of autonomous refrigerated wagon systems / O. A. Voron // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2(82). – P. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_86.

8 **Voron, O. A.** Aspects of improving the rail transportation of perishable goods as part of a continuous refrigeration chain / O. A. Voron, I. G. Morchiladze // Transport of the Russian Federation. – 2014. – No. 1(50). – P. 40–45. – ISSN 1994-831X.

9 **Kogan, V. B.** Theoretical foundations of typical processes of chemical technology / V. B. Kogan. – Leningrad : Chemistry, 1977. – 592 p.

10 **Povkh, I. L.** Technical hydromechanics / I. L. Povkh. – Leningrad : Mechanical engineering, 1976. – 502 p.

11 **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Энергия. – 1977. – 344 с.
12 **Ксенофонтова, В. А.** Обобщенная математическая модель процессов перевозок грузов / В. А. Ксенофонтова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 158–167. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-2-158.
13 **Коршак, А. А.** Ресурсосберегающие методы и технологии при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов / А. А. Коршак. – Уфа : Дизайн Полиграф-Сервис, 2006. – 191 с.

11 **Mikheev, M. A.** Fundamentals of heat transfer / M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. – Moscow : Energy. – 1977. – 344 p.
12 **Ksenofontova, V. A.** Generalized mathematical model of cargo transportation processes / V. A. Ksenofontova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2(82). – P. 158–167. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-2-158.
13 **Korshak A. A.** Resource-saving methods and technologies in the transportation and storage of oil and petroleum products / A. A. Korshak. – Ufa : Design Polygraph Service, 2006. – 191 p.

V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov

HEATING OF FROZEN PETROLEUM PRODUCTS DURING UNLOADING FROM TANKERS FOR VARIOUS PURPOSES IN WINTER CONDITIONS

Abstract. The subject of the paper is due to necessity to organize the transportation of the solidified bulk cargo on the territory of the Russian Federation at subzero temperatures. Such cargoes include boiler and naval fuel oil, cracking residues, heavy petroleum oils, tar and oil bitumen, etc. A method is considered that provides the creation of primary channels in the solidified mass of petroleum product with the possibility of using both a steam heating system and an electric heating system equipped with linear heating elements. The device provides rapid erosion of the solidified fraction carried out almost simultaneously with unloading. The proposed measures aimed at increasing the stability of the movement of a tank car or a tank car, as well as reducing the time and thermal energy costs when unloading solidified bulk cargo are easily feasible.

Keywords: tank wagon, tank car, transportation of solidified cargo, heating of viscous cargo, unloading at subzero temperatures.

For citation: Moiseev, V. I. Heating of frozen petroleum products during unloading from tankers for various purposes in winter conditions / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 169–176. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_169.

Сведения об авторах

Моисеев Владимир Иванович
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Математика и моделирование»,
доктор технических наук, доцент, профессор,
e-mail: moiseev_v_i@list.ru

Жебанов Александр Владимирович
Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Вагоны»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: zhebanov@inbox.ru

Information about the authors

Moiseev Vladimir Ivanovich
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair «Mathematics and Modeling»,
Doctorate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor,
e-mail: moiseev_v_i@list.ru

Zhebanov Alexander Vladimirovich
Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Wagons»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: zhebanov@inbox.ru