

УДК 629.463.32

В. И. Моисеев, Т. А. Комарова, А. В. Жебанов**ПРОБЛЕМА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК
ЛЕТНИХ МАРОК ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА
ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА**

Дата поступления: 08.07.2016

Решение о публикации: 30.09.2016

Цель: Теоретически проработать вопрос о возможности перевозки дизельного топлива летних сортов при низких температурах воздуха наличным подвижным составом, поскольку за время транспортирования топливо охлаждается до температур, при которых начинается физико-химическая реакция их фазового расслоения. **Методы:** Использованы математические методы расчета коэффициента теплоотдачи, тепловых и гидродинамических процессов. **Результаты:** Расчеты тепловых и гидродинамических процессов в окрестностях теплового аккумулятора обобщены рабочими формулами для коэффициента теплоотдачи с поверхности аккумулятора жидкому нефтепродукту. По результатам расчета предложено установить в цистернах тепловые аккумуляторы, возбуждающие термогравитационную конвекцию в массе жидкого нефтепродукта. **Практическая значимость:** Благодаря предложенным изменениям в конструкции цистерн с непрерывным перемешиванием и подогревом перевозимого топлива за счет установки теплового аккумулятора, возбуждающего термогравитационную конвекцию в массе жидкого нефтепродукта, появится возможность перевозить летнее дизельное топливо в зимнее время наличным подвижным составом.

Дизельное топливо, летний сорт, низкая температура, фазовое расслоение, термогравитационная конвекция, тепловой аккумулятор, вагон-цистерна.

***Vladimir I. Moiseyev**, D. Sci. (Eng.), professor, moiseev_v_i@list.ru (Petersburg State Transport University); **Tatyana A. Komarova**, Cand. Sci. (Eng.), lead researcher, komarova_tanusha@mail.ru (Scientific and implementational centre Disperse Systems); **Aleksandr V. Zhebanov**, senior lecturer, zhebanov@inbox.ru (Samara State Transport University) **PROBLEM OF RAIL TRANSPORTATION OF SUMMER GRADES OF DIESEL FUEL IN LOW AIR TEMPERATURES**

Objective: Theoretically consider the issue of possible transportation of summer-grade diesel fuel in low air temperatures by existing rolling stock, as during transportation the fuel cools down to temperatures under which physicochemical reaction of its phase separation starts. **Methods:** Mathematical methods for calculating heat emission coefficient, thermal and hydrodynamic processes were applied. **Results:** Calculations of thermal and hydrodynamic processes in the vicinity of thermal accumulator are combined by working formulae for heat emission coefficient from the accumulator surface for liquid oil product. As a result of calculations, it is proposed to install in the tanks thermal accumulators which stimulate heat-gravitational convection of hydrocarbon oils. **Practical importance:** Thanks to the proposed amendments to the design of tanks with continual stirring and heating of the transported fuel by installing a heating accumulator which stimulates heat-gravitational convection of hydrocarbon oils, it would be possible to transport summer-grade diesel fuel in wintertime by existing rolling stock.

Diesel fuel, summer grade, low temperature, phase separation, heat-gravitational convection, thermal accumulator, tank car.

Проблемы доставки летнего дизельного топлива в зимнее время

Известно, что тяжелая колесная и гусеничная техника, тепловозы и суда используют дизельное топливо (ДТ). Для их нормальной работы необходимо, чтобы топливо свободно прокачивалось в топливных системах двигателя и сохраняло эксплуатационные характеристики.

В России возникла устойчивая тенденция к снижению объемов производства марок ДТ «зимнее» и «арктическое», регламентированных ГОСТ 305-2013 [4]. По условиям изготовления они требуют снижения температуры кипения дизельных фракций и депарафинизации сырья, что уменьшает выход продукта на 30–40% от его потенциального содержания в нефти и делает производство нерентабельным. При общем росте выпуска летних сортов ДТ производство зимних марок сократилось более чем в три раза по сравнению с 2003 г. и уже не удовлетворяет запросам даже силовых ведомств по этим видам топлива.

Хранение летнего ДТ на обогреваемых складах и даже его эксплуатация на отдельных объектах в зимнее время допустимы, но его перевозка по железной дороге запрещена нормативными документами.

Все светлые нефтепродукты доставляют в цистернах, не имеющих тепловой изоляции котла, и зимой при длительных перевозках они могут охладиться до температур ниже -10°C . Охлаждение летнего ДТ сопровождается фазовым расслоением и выделением кристаллов парафиновых углеводородов (н-алканов), содержание которых в топливе достигает 15–20%. При повторном нагревании эта твердая фракция вторично в топливе не растворяется [11], и баланс содержащихся в нем присадок нарушается. Длительное охлаждение летнего ДТ при температурах ниже -10°C вызывает его застывание с образованием осадков из парафина, накапливающихся в нижней части котла цистерны. Таким образом, при железнодорожных перевозках летнее ДТ снижает свои эксплуатационные

характеристики вплоть до потери кондиционности, что и обуславливает запрет на его перевозку в зимний период. Этот запрет затрудняет обеспечение техникой промышленности, транспорта и строительства на севере страны и снабжение топливом вооруженных сил.

Необходимо разработать подвижной состав для перевозки летнего ДТ при низких температурах воздуха, при этом надо учитывать процессы, происходящие в самих жидких нефтепродуктах: охлаждение горячего топлива, рост его вязкости, фазовые превращения и термогравитационную конвекцию (ТГК), поскольку все нефтепродукты имеют большой коэффициент объемного теплового расширения ($\beta \approx 10^{-3} \text{ 1/град}$) [8].

ТГК в топливе, замедляющая образование кристаллов н-парафинов и выпадение их в осадок стимулируется установкой в цистерне тепловых аккумуляторов (ТА), заполненных теплоаккумулирующим материалом (ТАМ). Материал характеризуется большим удельным теплосодержанием ξ Дж/кг, обеспечиваемым фазовыми превращениями «плавление – затвердевание», происходящими при температурах T_{ϕ} , $^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим вариант, когда аккумулятор выполнен в виде двух стальных цилиндрических труб диаметром 250 мм, установленных параллельно оси котла цистерны на высоте 0,3 м от его нижней поверхности. При расстоянии между осями труб 1 м сливной патрубком располагается между ними.

Если температура фазового перехода ТАМ выше начальной температуры нефтепродукта $T_{\phi} > T_0$, аккумулятор разогревается до температур, не вызывающих кипения нефтегруза, которая у ДТ превышает $+300^{\circ}\text{C}$.

В качестве ТАМ можно использовать [11]:

- твердый парафин ($\xi = 210 \text{ кДж/кг}$, $T_{\phi} = +87^{\circ}\text{C}$);
- солевую смесь Локка $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (50%) + $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (45%) + CaCl_2 (1,5%) + глицерин (3,5%) ($\xi = 3120 \text{ кДж/кг}$, $T_{\phi} = +60^{\circ}\text{C}$);
- солевые смеси типа $7\text{NaNO}_3 + 40\text{NaNO}_2 + 53\text{KNO}_3$ ($\xi = 815 \text{ кДж/кг}$, $T_{\phi} = +142^{\circ}\text{C}$).

Закон изменения средней температуры нефтегруза в цистерне, $\bar{T}_ж$, движущейся при температуре воздуха T_g в течение времени t выражается через темп её охлаждения m , $1/c$ [1]:

$$\Theta^* = \left(\frac{\bar{T}_ж - T_g}{T_0 - T_g} \right) = e^{-mt}. \quad (1)$$

Темп охлаждения определяется площадью теплоотдающей поверхности $F_{ц}$ стального котла, m^2 , коэффициентом теплопередачи в окружающее пространство $k_{ц}$, $Вт/м^2 \text{ } ^\circ C$, и полной теплоемкостью C цистерны вместе с жидким нефтегрузом:

$$m_{ц} = \frac{k_{ц} F_{ц}}{C} = \frac{k_{ц} F_{ц}}{M_{ж} C_{ж} + M_{ст} C_{ст}} \approx \frac{k_{ц} F_{ц}}{M_{ж} C_{ж}}, \quad (2)$$

где $M_{ж}$ и $M_{ст}$ – соответственно, масса нефтегруза и корпуса котла, $кг$; $C_{ж}$ и $C_{ст}$ – удельная теплоемкость нефтепродукта и стали, соответственно, $Дж/кг \text{ } ^\circ C$.

Для цистерны с ТА можно ввести «эквивалентную теплоемкость» [5]:

$$C_{эkv} = M_{ст} C_{ст} + M_{ж} C_{ж} + \frac{\xi_0 M_{ТАМ}}{\bar{T}_{ТАМ} - T_{\Phi}}, \quad (3)$$

где $M_{ТАМ}$ – масса ТАМ в аккумуляторе; $\bar{T}_{ТАМ}$ – начальная температура ТАМ, ξ_0 – функция, определяемая равенством

$$\xi_0 = \begin{cases} \xi & \text{при } \bar{T}_{ТАМ} > T_{\Phi} \\ 0 & \text{при } \bar{T}_{ТАМ} \leq T_{\Phi} \end{cases}.$$

Темп охлаждения нефтегруза в цистерне с ТА будет

$$m_1 = \frac{k_{ц} F_{ц}}{C_{эkv}}. \quad (4)$$

Пренебрегая теплоемкостью обечайки котла из (2)–(4), получим отношение темпов охлаждения ДТ в цистерне с аккумулятором и без него:

$$\frac{m_{ц.т.а}}{m_{ц}} = \frac{1}{1 + \frac{\xi \cdot M_{ТАМ}}{(\bar{T}_{ТАМ} - T_{\Phi}) C_{ж}}}. \quad (5)$$

Пусть в цистерне, содержащей 60 т ДТ ($C_{ж} = 2,1$ $кДж/кг$), установлен ТА, содержащий 2 т ТАМ ($M_{ТАМ} = 2000$ $кг$) на основе смеси Локка. Исходя из характеристик этой смеси, получаем, согласно (5), $m_{ц} = 1,588 m_{ц.т.а}$. Из (1) следует, что время охлаждения нефтегруза t от начальной температуры до допустимого значения, равного $0 \text{ } ^\circ C$, возрастает в 1,588 раза.

Также можно снизить темп охлаждения летнего ДТ при перевозке в цистерне, уменьшив коэффициент теплопередачи $k_{ц}$ от горячего нефтегруза в окружающее пространство. Для этого на котел цистерны можно нанести временную теплоизолирующую оболочку, рассчитанную на сезонную эксплуатацию в один зимний период [6].

Учитывая большой диаметр котла, примем малый участок его поверхности за двухслойную плоскую стенку. Значение коэффициента теплопередачи для такой стенки будет

$$k_{ц} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_{ж}}},$$

где $\alpha_{в}$ и $\alpha_{ж}$ – коэффициенты теплоотдачи от стенки котла к наружному воздуху и от жидкости внутри котла к его стенке, соответственно, $Вт/м^2 \text{ } град$; $\delta_{ст}$ и $\delta_{из}$ – толщина стальной стенки котла и слоя тепловой изоляции, соответственно, $м$; $\lambda_{ст}$ и $\lambda_{из}$ – коэффициенты теплопроводности стали и изоляции, соответственно, $Вт/м \text{ } ^\circ C$.

Коэффициенты теплопередачи через стенку котла в отсутствие и при наличии на ней теплоизолирующей оболочки, соответственно, равны:

$$k_{ц} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{ж}}}; \quad (6)$$

$$k_{ц.т.и} \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_{ж}}}. \quad (7)$$

Примем, что у стальной обечайки котла $\lambda_{ст} = 40$ $Вт/м^2 \text{ } град$, $\delta_{ст} = 10^{-2}$ $м$, временная те-

плоизолирующая оболочка имеет толщину $\delta_{из} = 0,02$ м и выполнена из пенополиуретана $\lambda_{из} = 0,025$ Вт/м °С, наносимого напылением на поверхность котла в условиях депо. Такой вариант оболочки отличается простотой и низкой себестоимостью изготовления, малыми трудозатратами и не требует специального оборудования [7]. Ориентировочная стоимость создания оболочки на одну цистерну 30–50 тыс. руб.

По мере износа оболочка легко удаляется скребком и смывкой.

При коэффициентах теплоотдачи $\alpha_{в} = 40$ Вт/м² град и $\alpha_{ж} = 5$ Вт/м² град из формул (6) и (7) находим:

$$k_{ц} = 4,5 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}; k_{ц.т.и} = 0,8 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}.$$

Из (2) следует, что отношение темпов охлаждения нефтегруза в цистерне без оболочки $m_{ц}$ и с оболочкой $m_{ц.т.и}$ равно

$$\frac{m_{ц}}{m_{ц.т.и}} = \frac{k_{ц}}{k_{ц.т.и}} = 5,6.$$

Соответственно, и время охлаждения ДТ от начальной температуры налива до 0 °С возрастает в 5,6 раза.

Тепловые аккумуляторы вводятся в конструкцию котла цистерны, а тонкая тепловая изоляция наносится с наступлением зимнего периода и снимается по мере необходимости.

Создание термогравитационной конвекции в жидком нефтепродукте тепловыми аккумуляторами

Остается важный вопрос об отдаче теплоты от нагретого аккумулятора к движущейся жидкости в условиях установившейся ТГК. Известны многочисленные экспериментальные исследования теплообмена такого рода, но теоретическая проработка вопроса еще не завершена.

Ожидается, что сравнительно низкая избыточная температура поверхности ТА от-

носительно жидкости возбудит её медленное течение, близкое к ползущему, характеризующему малыми числами Рейнольдса. В этом режиме силы инерции, пропорциональные квадрату скорости жидкости u^2 , считаются пренебрежимо малыми по сравнению с силами трения, пропорциональными первой степени скорости u .

Ползущее движение жидкости охватывает всю поверхность ТА и имеет свойства, характерные для ламинарного пограничного слоя толщиной δ , в котором перенос теплоты происходит за счет теплопроводности.

Введем систему координат, где ось x направлена вертикально вверх, а ось y – горизонтально. Рассмотрим установившееся течение, в котором составляющие скорости u_x и u_y не меняются со временем:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0; \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0.$$

Величина δ является неопределенной, так как в пограничном слое скорость u_x изменяется от нуля на поверхности тела до скорости U вдали от неё. Жидкость вдали от ТА движется из-за колебаний вагона, его ускорения и торможения, но далее мы пренебрегаем этими движениями жидкости. Толщину пограничного слоя считаем изменяющейся по течению потока $\delta = \delta(x)$. Введем в рассмотрение безразмерные величины:

- Θ – температурный параметр, определяемый температурой среды внутри пограничного слоя T , за его пределами T_0 и стенки цилиндра T_w , °С,

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_w - T_0}; \quad (8)$$

- координату точки внутри пограничного слоя

$$\eta = \frac{y}{\delta}; \quad (9)$$

- критерии Грасгофа Gr_D и Прандтля Pr , которые определяются значениями диаметра D аккумулятора, ускорения свободного падения

g , m/c^2 , и параметрами жидкости – коэффициентами объемного теплового расширения β , $1/град$, кинематической вязкости ν , m^2/c , и температуропроводности a , m^2/c :

$$Gr_D = \frac{g\beta D^3(T_w - T_0)}{\nu^2}; \quad (10)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (11)$$

Уравнения движения, неразрывности и теплопереноса, описывающие ТГК жидкости, в теории пограничного слоя имеют вид [9, 10]

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + Gr_D \cdot \Theta; \quad (12)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0; \quad (13)$$

$$u_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}. \quad (14)$$

Система уравнений (12)–(14) рассматривается с условиями:

$$u_y|_{y=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad \Theta|_{y=0} = 1; \quad (15)$$

$$u_x|_{y=\delta} = U(x) \approx 0; \quad \Theta|_{y=\delta} = 0;$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right|_{y=\delta} = 0. \quad (16)$$

Интегральные соотношения, описывающие пограничный слой, получаем, умножая (10) на u_x и интегрируя это выражение по y в пределах толщины пограничного слоя:

$$\int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy + \int_0^\delta u_y u_x \frac{\partial u_x}{\partial y} dy = \int_0^\delta u_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} dy + Gr_D \int_0^\delta u_x \Theta dy. \quad (17)$$

Используя (13), (15) и (16), вычисляем каждый интеграл методом интегрирования по частям:

$$\begin{aligned} \int_0^\delta u_y u_x \frac{\partial u_x}{\partial y} dy &= \frac{1}{2} \int_0^\delta u_y \frac{\partial u_x^2}{\partial y} dy = \\ &= \frac{U^2 u_y(x, \delta)}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_y}{\partial y} dy = \\ &= \frac{U^2 u_y(x, \delta)}{2} + \frac{1}{2} \int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy; \\ \int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy + \int_0^\delta u_y u_x \frac{\partial u_x}{\partial y} dy &= \\ &= \frac{U^2}{2} \left[U \frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d}{dx} \int_0^\delta u_x dy \right] + \frac{3}{2} \int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy. \end{aligned}$$

Очевидно, что

$$\begin{aligned} \int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy &= \frac{1}{3} \int_0^\delta \frac{\partial u_x^3}{\partial x} dy = \\ &= \frac{d}{dx} \int_0^\delta \frac{u_x^3}{3} dy - \frac{U^3}{3} \frac{d\delta(x)}{dx}. \end{aligned}$$

Использование краевых условий (15) дает

$$\int_0^\delta u_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} dy = - \int_0^\delta \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 dy.$$

Подставляя полученные результаты в (17), сводим это уравнение к виду

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dx} \int_0^\delta u_x^3 dy = - \int_0^\delta \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^3 dy + Gr_D \int_0^\delta u_x \Theta dy. \quad (18)$$

Теперь преобразуем левую часть уравнения теплопереноса (14). Формально введем скорости под знак производных, выполним дифференцирование и, используя выражение (8), получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta u_x}{\partial x} + \frac{\partial \Theta u_y}{\partial y} &= \left[u_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right] + \\ &+ \Theta \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] = u_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \Theta}{\partial y}. \end{aligned}$$

При этом равенство (14) запишется таким образом:

$$\frac{\partial \Theta u_x}{\partial x} + \frac{\partial \Theta u_y}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}. \quad (19)$$

Умножаем (19) на dy и интегрируем в пределах толщины пограничного слоя:

$$\int_0^{\delta} \frac{\partial \Theta u_x}{\partial x} dy + \int_0^{\delta} \frac{\partial \Theta u_y}{\partial y} dy = \frac{1}{Pr} \int_0^{\delta} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} dy.$$

Вычисляя каждый интеграл в отдельности и учитывая граничные условия (16), получим уравнение теплового потока через пограничный слой [13]:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta} \Theta u_x dy = - \frac{1}{Pr} \left. \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right|_{y=0}. \quad (20)$$

Подобные друг другу поля скоростей и температур в пограничном слое описываются уравнениями второй степени [1]:

$$u_x(x) = w(x)(1 - \eta^2); \quad (21)$$

$$\Theta = (1 - \eta)^2, \quad (22)$$

где $w(x)$ – функция, подлежащая определению. Подставляя (14) и (15) в интегральные соотношения (18) и (20), находим:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \left[w^3 \delta \int_0^1 (1 - \eta^2)^3 d\eta \right] = \\ & = - \frac{w^2}{\delta} \int_0^1 \left[\frac{\partial}{\partial \eta} (1 - \eta^2) \right]^2 d\eta + \\ & + Gr_D \cdot w \cdot \delta \int_0^1 (1 - \eta^2)(1 - \eta)^2 d\eta; \\ & \frac{d}{dx} \left[w \cdot \delta \int_0^1 (1 - \eta^2)(1 - \eta)^2 d\eta \right] = \frac{2}{Pr \cdot \delta}. \end{aligned}$$

Раскрываем скобки и выполняем интегрирование:

$$\frac{8}{35} \frac{d}{dx} (w^3 \delta) = - \frac{4}{3} \frac{w^2}{\delta} + \frac{3}{10} Gr_D \cdot w \cdot \delta; \quad (23)$$

$$\frac{3}{10} \frac{d}{dx} (w \delta) = \frac{2}{Pr} \cdot \frac{1}{\delta}. \quad (24)$$

Ищем решения уравнений (23) и (24) в виде показательных функций с неизвестными коэффициентами и показателями степеней:

$$w(x) = C_1 x^m; \quad \delta = \delta(x) = C_2 x^n. \quad (25)$$

Подстановка (25) в уравнения (22) и (23) дает:

$$\begin{aligned} & \frac{8}{35} (3m + n) C_1^3 C_2^3 x^{3m+n-1} = \\ & = - \frac{4}{3} \frac{C_1^2}{C_2} x^{2m-n} + \frac{3}{10} Gr_D C_1 C_2 x^{m+n}; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\frac{3}{10} C_1 C_2 (m + n) x^{m+n-1} = \frac{1}{Pr} \cdot \frac{x^{-n}}{C_2}. \quad (27)$$

Функции (25) считаются решениями рассматриваемой системы. Тогда выражения (26) и (27) должны выполняться при любых x , а для этого нужно, чтобы показатели степеней x в каждом слагаемом были одинаковы:

$$3m + n - 1 = 2m - n;$$

$$2m - n = m + n;$$

$$m + n - 1 = -n.$$

Отсюда легко найти, что $m = 1/2$, а $n = 1/4$. Подставляя найденные значения m и n в равенства (26) и (27), вторично получаем систему уравнений с неизвестными коэффициентами C_1 и C_2 :

$$12 C_1^2 C_2^2 = -40 C_1 + 9 Gr_D C_2^2; \quad 9 C_1 C_2^2 = \frac{20}{Pr}.$$

Из этой системы находим численные значения коэффициентов:

$$C_1 = \sqrt{2 Gr_D} \cdot (2,67 + Pr)^{-\frac{1}{2}};$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{113}{18}} (2,67 + Pr)^{\frac{1}{4}} Pr^{-\frac{1}{2}} (Gr_D)^{\frac{1}{4}}.$$

Значения критерия Прандтля (11) для ДТ при температурах $-30 \dots 0$ °С составляют $Pr = 140-70$. При этом первое слагаемое в скобках у полученных равенств пренебрежимо меньше второго. Эти равенства запишем так [12, 15]:

$$C_1 = \sqrt{\frac{2Gr_D}{Pr}}; C_2 = 2,5(Gr_D \cdot Pr)^{-1/4}.$$

Совместное влияние критериев Грасгофа (10) и Прандтля (11) для жидкостей с $Pr > 1$ выражают в виде числа Релея $Ra_D = Gr_D \cdot Pr$, оно удобно при описании процессов, связанных с ТГК в ограниченном объеме:

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr = \frac{g\beta(T_w - T_0)D^3}{\nu \cdot a}.$$

Подставляя значения m, n, C_1 и C_2 в равенства (20), получаем:

$$w(x) = C_1 x^m = \sqrt{\frac{2Gr_D}{Pr}} x; \quad (28)$$

$$\delta(x) = C_2 x^n = 2,5 \cdot 4 \sqrt[4]{\frac{x}{Ra_D}}. \quad (29)$$

Из (28) и (21) находим функцию, характеризующую распределение составляющей скорости u_x в пограничном слое в направлении течения:

$$u_x(x) = \sqrt{\frac{2Gr_D}{Pr}} (1 - \eta^2) \cdot \sqrt{x}.$$

Тепловой баланс на поверхности нагретого цилиндра диаметром D находят из известного соотношения, определяющего граничные условия третьего рода, называемые также уравнением теплоотдачи:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{T_w - T_0} \left(\frac{dT}{dn} \right)_{n \rightarrow 0}, \quad (30)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от поверхности нагретого тела в жидкой среде, Вт/м² °С; λ – коэффициент теплопроводности этой среды, Вт/м °С;

Используя равенства (8) и (9), перепишем (30) так:

$$\begin{aligned} \alpha(T_w - T_0) &= \\ &= -\lambda \frac{T_w - T_0}{D} \int_0^D \left(\frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)_{y \rightarrow 0} dx. \end{aligned} \quad (31)$$

При этом из (22) и (9) следует, что

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \right)_{y \rightarrow 0} = \left(\frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \right)_{\eta \rightarrow 0} = 2(1 - \eta)_{\eta \rightarrow 0} = 2;$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{\delta}.$$

Таким образом, равенство (31) принимает вид

$$Nu = \frac{\alpha D_1}{\lambda} = 2 \int_0^{D_1} \frac{dx}{\delta}. \quad (32)$$

В левой части равенства записан комплекс, называемый числом Нуссельта – это безразмерный коэффициент теплоотдачи [2].

Верхний предел интегрирования определяется из условий, что в окрестностях нагретого цилиндра существует устойчивый слой, теплота из которого уносится конвекцией [3]. Толщину этого слоя экспериментально определил Ленгмюр (цит. по [8]), который установил, что $D_1 = 0,73$. В результате интегрирования (32) с учетом равенства (29) получаем безразмерный коэффициент теплоотдачи от ТА к нефтегрузу в цистерне:

$$Nu = 0,84(Ra_D)^{1/4}.$$

Академик М. А. Михеев, обобщая результаты экспериментов по теплоотдаче горизонтальных и вертикальных труб и плит в ламинарном режиме их обтекания различными жидкостями, получил аналогичную формулу, но с меньшим значением коэффициента:

$$Nu = 0,54(Ra)^{1/4}.$$

Тепловой аккумулятор не только разогревает [14], но и вызывает принудительную ТГК дизельного топлива в котле цистерны, которая выравнивает поле температур в нефтегрузе и препятствует его фазовому расслоению. Над ним образуется восходящий шлейф жидкости, непрерывно перемешивающий содержимое котла цистерны. С ростом высоты H от оси

цилиндра безразмерная температура жидкости (8) уменьшается достаточно медленно:

$$\Theta = 0,8\sqrt{\frac{D}{H}}.$$

Тепловой аккумулятор, установленный в цистерне, в принципе можно периодически заряжать, например перед операцией слива. Для этого внутри него надо установить трубы малого диаметра и пропускать через них острый пар. Данная операция пожаробезопасна и технически легко осуществима.

Заключение

Установка тепловых аккумуляторов внутри котла цистерны и временной теплоизолирующей оболочки на её наружной поверхности способны обеспечить тепловой режим в массе транспортируемого нефтепродукта, при котором обеспечивается возможность перевозки летних сортов дизельного топлива в зимнее время наличным подвижным составом для светлых нефтепродуктов.

Библиографический список

1. Андриевский А. П. Свободная конвекция при нелинейной зависимости плотности от температуры : плоские задачи / А. П. Андриевский, В. Н. Коровкин // ИФЖ. – 2000. – Т. 73, № 2. – С. 381–386.
2. Бахмат Г. В. Хранение нефти и нефтепродуктов / Г. В. Бахмат. – Тюмень : Вектор, 2002. – 536 с.
3. Бронштейн И. С. Об одном приближенном методе решения уравнений пограничного слоя / И. С. Бронштейн, В. Е. Губин // Тр. ВНИИСПТ нефть. – 1971. – Вып. 8. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – С. 100–103.
4. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия.
5. Домбровский Л. А. Модель эффективной теплопроводности для расчета свободно-конвективного теплообмена при больших числах Рэ-

ля / Л. А. Домбровский, Л. И. Зайчик, Ю. А. Зейгарник // Докл. РАН. – 1999. – Т. 366, № 4. – С. 479–482.

6. Жебанов А. В. Взаимодействие теплоизоляционного слоя цистерны с окружающей средой с точки зрения экологической безопасности и с учетом утилизации отходов / А. В. Жебанов // Вестн. транспорта Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 19–23.

7. Жебанов А. В. Проблема железнодорожных перевозок летних марок дизельных топлив при низких температурах воздуха / А. В. Жебанов, В. И. Моисеев, Т. А. Комарова // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : материалы XXI междунар. науч.-технич. конф. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – С. 46–48.

8. Киселев И. Г. Способы и устройства экономии топлива на железнодорожном транспорте / И. Г. Киселев. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1991. – 57 с.

9. Кочин Н. Е. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2 / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. – М. : Физматлит, 1963. – С. 565–566.

10. Лейбензон Л. С. Энергетическая форма интегрального условия в теории пограничного слоя / Л. С. Лейбензон // Тр. ЦАГИ. – 1935. – Вып. 240.

11. Литвиненко А. Н. Экспериментально-теоретическое исследование зависимостей низкотемпературных свойств летних дизельных топлив и их смесей с топливами для реактивных двигателей и депрессорными присадками / А. Н. Литвиненко и др. // Химмотология горючего и технические средства нефтепродуктообеспечения ; под ред. А. Н. Литвиненко. – Ульяновск : ИП Качалин, 2009. – С. 96–104.

12. Минаковский В. М. Обобщенные переменные теории переноса / В. М. Минаковский. – Киев : Высш. шк., 1978. – 184 с.

13. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

14. Моисеев В. И. Применение аккумуляторов тепловой энергии на средствах и сооружениях железнодорожного транспорта / В. И. Моисеев и др. // Материалы IV всерос. конф. «Фундаментальные исследования в технических университетах». – СПб. : ГТУ, 2000. – 103 с.

15. Себиси Т. Конвективный теплообмен / Т. Себиси, П. Брэдшоу. – М. : Мир, 1987. – 590 с.

References

1. Andriyevskiy A. P. & Korovkin V. N. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2000, T. 73, no. 2, pp 381-386.
2. Bakhmat G. V. *Khraneniye nefi i nefteproduktov* [Storage of Oil and Oil Products]. Tyumen, Vektor, 2002. 536 p.
3. Bronshteyn I. S. & Gubin V. Ye. *Ob odnom priblizhenom metode resheniya uravneniy pogranichnogo sloya* [On an Approximative Method of Solution for Boundary Layer Equations]. *Trudy VNIISPTneft – VNIISPTneft Proc.*, 1971. Is. 8. Transport and Storage of Oil and Oil Products, pp. 100-103.
4. State Standard GOST 305-2013. *Topливо dizelnoye. Tekhnicheskiye usloviya* [Diesel Fuel. Technical Conditions].
5. Dombrovskiy L. A., Zaychik L. I. & Zeygarnik Yu. A. *Doklady RAN – Reports of the Russian Academy of Sciences*, 1999, Vol. 366, no. 4, pp. 479-482.
6. Zhebanov A. V. *Vestnik transporta Povolzhya – Volga Region Trans. Bull.*, 2012, no. 4, pp. 19-23.
7. Zhebanov A. V., Moiseyev V. I. & Komarova T. A. *Problema zhelezodorozhnykh perevozok letnykh marok dizelnykh topliv pri nizkikh temperaturakh vozdukha* [Problem of Rail Transportation of Summer-Grade Diesel Fuels in Low Air Temperatures]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty: materialy XXI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Rolling Stock of the 21st Century: Ideas, Requirements, Projects. Papers of the 21st Int. Sci. and Technical Conf.]. St. Petersburg, FGBOU VO PRUPS, 2016. Pp. 46-48.
8. Kiselev I. G. *Sposoby i ustroystva ekonomii topliva na zhelezodorozhnom transporte* [Methods and Devices for Saving Fuel of Rail Transport]. Leningrad, Leningrad Railway Transp. Eng. Inst., 1991. 57 p.
9. Kochin N. Ye., Kibel I. A. & Roze N. V. *Teoreticheskaya gidromekhanika* [Theoretical Fluid Mechanics]. Pt. 2. Moscow, Fizmatlit, 1963. Pp. 565-566.
10. Leybenzon L. S. *Energeticheskaya forma integralnogo usloviya v teorii pogranichnogo sloya* [Energy Form of Integral Condition in Boundary Layer Theory]. *Trudy TsAGI [Proc. of TsAGI]*, 1935, Is. 240.
11. Litvinenko A. N. et al. *Eksperimentalno-teoreticheskoye issledovaniye zavisimostey nizkotemperaturnykh svoystv letnykh dizelnykh topliv i ikh smesey s toplivami dlya reaktivnykh dvigateley i depressornymi prisadkami* [Experimental and Theoretical Study of Dependencies of Low-Temperature Properties of Summer-Grade Diesel Fuels and Their Mixtures with Jet Propulsion Fuels and Depressor Additives]. *Khimotologiya goryuchego i tekhnicheskiye sredstva nefteproduktobespecheniya* [Chemotology of Fuel and Technical Means for Oil Products Supply]; ed. A. N. Litvinenko. Ulyanovsk, IP Kachalin, 2009. Pp. 96-104.
12. Miakovskiy V. M. *Obobshchennyye peremennyye teorii perenosa* [Generalised Variable Transfer Theories]. Kiev, Vysshaya shkola, 1978. 184 p.
13. Mikheyev M. A. & Mikheyeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Heat Transfer Principles]. Moscow, Energiya, 1977. 344 p.
14. Moiseyev V. I. et al. *Primeneniye akkumulyatorov teplovoy energii na sredstvakh i sooruzheniyakh zhelezodorozhnogo transporta* [Application of Thermal Energy Accumulators on Devices and Structures of Rail Transport]. *Materialy IV vserossiyskoy konferentsii Fundamentalnyye issledovaniya v tekhnicheskikh universitetakh* [Papers of the 4th All-Russian Conference for Fundamental Studies at Tech. Univ.]. St. Petersburg, GTU, 2000. 103 p.
15. Sebis T. & Bredshou P. *Konvektivnyy teploobmen* [Convective Heat Exchange]. Moscow, Mir, 1987. 590 p.

*МОИСЕЕВ Владимир Иванович – доктор техн. наук, профессор, moiseev_v_i@list.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); КОМАРОВА Татьяна Александровна – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, komarova_tanusha@mail.ru, (НВЦ «Дисперсные системы»); ЖЕБАНОВ Александр Владимирович – старший преподаватель, zhebanov@inbox.ru (Самарский государственный университет путей сообщения).