

Совершенствование методов расчета охлаждения загустевающих нефтепродуктов при железнодорожных перевозках в цистернах



А. В. Жебанов,
инспектор по приемке вагонов отдела по безопасности движения поездов и сохранности вагонного парка Службы вагонного хозяйства Куйбышевской дирекции инфраструктуры структурного подразделения центральной дирекции инфраструктуры филиала ОАО «РЖД»

Специализированный вагон-цистерна для перевозки загустевающих нефтепродуктов, оборудованный паробоггревательным кожухом, отличается по своим термодинамическим характеристикам, в частности по коэффициенту теплоотдачи, от цистерн, обычно принимаемых за основу при расчетах охлаждения применительно к мазутам и маслам. Течения горячей жидкости при термогравитационной конвекции (ТГК) происходят как вдоль стенок котла, так и в радиальном направлении, таким образом, циркулирующая в цистерне горячая жидкость охлаждается значительно быстрее, чем неподвижная. Для снижения скорости охлаждения вязких нефтепродуктов может быть рассмотрено решение, заключающееся в установке теплоизолирующей оболочки.



Т. А. Комарова,
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НВЦ «Дисит», Санкт-Петербург

В применяемых методиках расчета охлаждения мазутов и масел при железнодорожных перевозках в цистернах считается, что нефтепродукт — это неподвижная среда, охлаждение которой обеспечивается равномерной теплопередачей через стальную стенку котла. Для количественной оценки процесса вводится средний по поверхности котла коэффициент теплоотдачи [1]:

$$\alpha_{\text{конв}} = 0,032 \frac{\lambda_g}{L_{\text{ц}}} \left(\frac{u_g D}{\nu_g} \right)^{0,8},$$

где $L_{\text{ц}}$ и D — длина и диаметр котла цистерны, м, λ_g — теплопроводность воздуха, Вт/м·К, ν_g — его кинематическая вязкость м²/с, u_g — скорость потока воздуха, обтекающего цистерну, м/с.

При скорости воздушного потока $u_g \approx 10\text{--}20$ м/с (соответствующей среднепутевой скорости состава 30–60 км/ч) значения коэффициента теплоотдачи определенные по формуле (1), составят $\alpha_{\text{конв}} = 25\text{--}50$ Вт/м²·К.

Однако для вагонов-цистерн, применяемых для перевозки вязких нефтепродуктов, условие $\alpha_{\text{конв}} = \text{const}$ не выполняется из-за наличия на цистерне паробоггревательного кожуха, покрывающего ~ 50% площади поверхности котла в нижней его части.

Воздушный зазор между стенкой котла и кожухом толщиной $\delta = 36$ мм создает значительное термическое сопротивление, уменьшая теплоотдачу в нижней части цистерны, где эквивалентный коэффициент теплоотдачи равен

$$\alpha_{\text{экв}}^{\text{нижн}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{конв}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{возд}}}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{ст}}/\lambda_{\text{ст}} = 1,72 \cdot 10^{-4}$ м²·К/Вт — суммарное термическое сопротивление стальных стенки котла и кожуха; $1/\alpha_{\text{конв}} \sim 0,02\text{--}0,04$ м²·К/Вт — термическое сопротивление внешней конвективной теплоотдачи; $\delta/\lambda_{\text{возд}} = 1,58$ м²·К/Вт — термическое сопротивление воздушного зазора под кожухом. Последняя величина — наибольшая из всех, она определяет суммарный коэффициент теплоотдачи на нижней части котла $\alpha_{\text{экв}}^{\text{нижн}} = 0,46$ Вт/м²·К.

В верхней части котла (исключая малую область над свободной поверхностью жидкости) теплосъем обеспечивается вынужденной конвекцией потока воздуха, при которой коэффициент теплоотдачи почти в 50–100 раз больше, чем в нижней части котла:



В. И. Моисеев,
канд. техн. наук, доцент кафедры «Математика и моделирование», Петербургский государственный университет путей сообщения

$$\alpha_{\text{экв}}^{\text{верхн}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{конв}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}} \approx \alpha_{\text{конв.}} = 25 \dots 50 \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (2)$$

Различие в величинах резко возрастает при атмосферных осадках (дожде и мокром снеге), которые выпадают на верхнюю часть котла и интенсивно охлаждаются. Такие осадки типичны для всей территории России.

Когда на верхнюю половину движущейся цистерны попадает мокрый снег, то плотность теплового потока на ней определяются суммой тепловых потоков, расходуемых на конвективную теплоотдачу $q_{\text{конв}}$, на нагрев осевшей жидкой воды $q_{\text{н.в}}$ и ее испарение $q_{\text{исп}}$, на нагрев до температуры плавления осевшего снега $q_{\text{нс}}$ и на его плавление $q_{\text{пл}}$. В таблице содержатся величины: $s_{\text{пл}} = 335$ кДж/кг и $s_{\text{исп}} = 2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг — удельные теплота плавления льда и испарения воды, соответственно; $C_{\text{л}} = 2,1$ кДж/кг·К, $C_{\text{в}} = 4,19$ кДж/кг·К, и $C_{\text{п}} \approx 1000$ Дж/кг·К — соответственно, удельные теплоемкости льда, воды и воздуха (изобарная), $T_{\text{г}}$, $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{ст}}$ — соответственно, температура воздуха, капель воды и стенки котла, °С; $(p_{\text{сн}} - p_{\text{с}})$ — разность парциальных давлений насыщенного водяного пара у влажной поверхности, т.е. внутри пограничного слоя ($p_{\text{сн}}$) и вне его ($p_{\text{с}}$), Па; $P_{\text{г}} = 10^5$ Па — давление воздуха; $W_{\text{в}} \approx (1 \dots 10) \cdot 10^{-2}$ кг/м³ — водность потока (содержание воды в 1 м³ воздуха).

Для указанных тепловых потоков вводятся эквивалентные коэффициенты теплоотдачи α_i по формуле

$$\alpha_i = \frac{q_i}{(T_{\text{ст}} - T_{\text{г}})} \quad (3)$$

В качестве примера рассмотрены условия $T_{\text{г}} = -5$ °С; $W_{\text{в}} = 10^{-2}$ кг/м³ (снегопад); $T_{\text{ст}} = 40$ °С; $u_{\text{г}} = 15$ м/с, $\alpha_{\text{конв}} = 35$ Вт/м²К. Рассчитанные для этих условий значения коэффициентов теплоотдачи также показаны в табл. 1.

Заметно, что полный коэффициент теплоотдачи в верхней части котла имеет очень большую величину: $\alpha_{\Sigma} = 300$ Вт/м²К, т.е. почти в 700 раз превышает коэффициент теплоотдачи в нижней части котла, под кожухом.

Интенсивная внешняя теплоотдача вызывает охлаждение верхних слоев нефтегруза в цистерне, что сопровождается ростом его плотности и переходом среды в неустойчивое состояние. В массе горячего нефтепродукта возникает ТГК, которая является определяющим фактором его быстрого охлаждения.

Таблица 1. Удельные тепловые потоки и эквивалентные коэффициенты теплоотдачи на верхней половине котла цистерны в условиях атмосферных осадков [2].

Удельный тепловой поток, Вт/м ²	Формула	$\alpha_{\text{экв}}$ Вт/м ² К
Теплоотдача потоку воздуха	$q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} (T_{\text{ст}} - T_{\text{г}})$	35,5
Нагрев жидкой воды	$q_{\text{н.в}} = W_{\text{в}} \cdot u_{\text{г}} \cdot C_{\text{в}} (T_{\text{ст}} - T_{\text{г}})$	186,7
Испарение осевшей воды	$q_{\text{исп}} = 0,622 \cdot \frac{\alpha_{\text{конв}} \cdot s_{\text{исп}}}{C_{\text{п}}} \left(\frac{p_{\text{сн}} - p_{\text{с}}}{P_{\text{г}}} \right)$	28,6
Нагрев снега до точки плавления	$q_{\text{нс}} = W_{\text{л}} \cdot u_{\text{г}} \cdot C_{\text{л}} (0 - T_{\text{г}})$	11,56
Плавление осевшего снега	$q_{\text{пл}} = W_{\text{л}} \cdot u_{\text{г}} \cdot s_{\text{пл}}$	37,33
Суммарные величины	$q_{\Sigma 2} = q_{\text{конв}} + q_{\text{н.в}} + q_{\text{исп}} + q_{\text{нс}} + q_{\text{пл}}$	300

Процесс ТГК наиболее интенсивен в первые часы после налива продукта в цистерну, когда его температура велика ($T_{\text{ж}} \approx 100$ °С), а вязкость мала. Малые значения вязкости нефтепродукта позволяют описывать процесс ТГК исходя из модели, известной как «приближение Буссинеска». Модель применяют для жидкостей со значениями критерия Прандтля ($Pr \leq 50$).

У мазутов М20, М40, Ф-5, Ф-12 и большого числа масел это условие выполняется, для более вязких продуктов модель Буссинеска дает грубый, оценочный результат [3].

Стальная стенка котла имеет большую толщину $\delta = 10$ мм, а котел цистерны — большой диаметр $D = 3$ м, поэтому боковую часть поверхности котла можно рассматривать как изотермическую вертикальную пластину высотой l , имеющую постоянную температуру $T_{\text{ст}}$.

При температуре жидкости вдали от стенки $T_{\text{ж}}$, сила, вызывающая движение единичного объема жидкости, равна

$$\vec{F} = \vec{g}(\rho - \rho_0),$$

где ρ и ρ_0 — плотность жидкости при температурах $T_{\text{ст}}$ и $T_{\text{ж}}$, соответственно.

Работа силы на вертикальном участке длиной L обуславливает приращение кинетической энергии единичного объема:

$$\frac{\rho u^2}{2} \approx gL(\rho - \rho_0).$$

Отсюда скорость движения жидкости вдоль стенки:

$$u_x = \sqrt{\frac{2gL(\rho - \rho_0)}{\rho}} \quad (4)$$

Плотность жидкости ρ как функцию температуры записывают разложением в ряд Тейлора относительно значения ρ_0 :

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial T} (T_{\text{ж}} - T_{\text{н0}}) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \rho}{\partial T^2} (T_{\text{ж}} - T_{\text{н0}})^2 \dots \quad (5)$$

Коэффициент объемного теплового расширения β равен

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$$

Тогда выражение (3) принимает вид

$$\rho - \rho_0 = \rho \beta (\dot{\Delta} T_{\text{ж}} - \dot{\Delta} T_{\text{н0}}) + \frac{\rho \beta^2}{2!} (\dot{\Delta} T_{\text{ж}} - \dot{\Delta} T_{\text{н0}})^2 \dots \quad (6)$$

У жидких нефтепродуктов величина коэффициента $\beta \sim 10^{-3}$ 1/°С, при этом $\beta \cdot (T_{\text{ж}} - T_{\text{ст}}) \ll 1$. Следовательно, ряд (6) быстро сходится, что позволяет ограничиться только первым его членом:

$$\rho - \rho_0 = \rho \beta (T_{\text{ж}} - T_{\text{ст}}) \quad (7)$$

Подставляя (7) в (4), получаем скорость циркуляционного движения нефтепродукта при ТГК:

$$u_{\text{ТГК}} = \sqrt{g \beta (T_{\text{ж}} - T_{\text{ст}}) L} \quad (8)$$

При температурных перепадах $\Delta T = T_{\text{ж}} - T_{\text{ст}} = 15 - 30$ °С скорость циркуляционного движения жидкости:

$$u_{\text{ТГК}} = 0,25 \dots 0,37 \text{ м/с.}$$

Процесс ТГК описывают, используя число Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \beta L^3 \Delta T}{\nu_{\text{ж}}^2} \quad (9)$$

Подстановка $g \beta \Delta T$ из (9) в (8) дает универсальную формулу скорости:

$$u_{\text{ТГК}} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{L} \sqrt{Gr} \quad (10)$$



В жидкостях перенос энергии осуществляется как теплопроводностью, так и конвекцией. При этом перенос массы определяется расходом $\vec{q}_{\text{конв}}^m$ через единичную площадку, перпендикулярную вектору скорости потока, кг/м²с:

$$\vec{q}_{\text{конв}}^m = \rho_{\text{ж}} \vec{u}. \quad (11)$$

Движущаяся жидкость обладает суммарной энергией, включающей кинетическую $u^2/2$, потенциальную (энергию давления) $p/\rho_{\text{ж}}$ и тепловую $C_{\text{ж}}T$ составляющие. Энтальпия i единичной массы продукта (дж/кг) равна:

$$i = C_{\text{ж}}T + p/\rho_{\text{ж}} + u^2/2. \quad (12)$$

Плотность потока энергии $\vec{q}_{\text{конв}}^c$ при конвекции (дж/м²с) находим из (11) и (12):

$$\vec{q}_{\text{конв}}^c = \vec{q}_{\text{конв}}^m \cdot i = \rho_{\text{ж}} \vec{u} (C_{\text{ж}}T + p/\rho_{\text{ж}} + u^2/2) \approx \rho_{\text{ж}} i \vec{u}. \quad (13)$$

Так как стенки котла имеют форму горизонтального цилиндра, вектор скорости имеет не только тангенциальную, но и радиальную составляющие. Течения горячей жидкости при ТГК происходят не только вдоль стенок котла, возникают токи и в радиальном направлении (хотя и с гораздо меньшей скоростью), поэтому циркулирующая в цистерне горячая жидкость охлаждается значительно быстрее, чем неподвижная.

При большой теплоемкости ($C_{\text{ж}} \approx 2000$ Дж/кг °С) и низкой теплопроводности ($\lambda_{\text{т}} \approx 0,11$ Вт/м °С) продуктов даже при малых скоростях их циркуляции конвективный теплоперенос значительно превышает молекулярную теплопроводность $|\vec{q}_{\text{конв}}^c| \gg |\vec{q}_{\text{т}}|$.

Сделаем следующую оценку. Выделим в жидкости цилиндр малой длины, опирающийся на единичную площадку. Примем, что на его концах есть перепад температур ΔT , а вдоль его оси со скоростью u движется жидкость, имеющая теплоемкость $C_{\text{ж}}$, плотность $\rho_{\text{ж}}$ и теплопроводность $\lambda_{\text{ж}}$. Тогда плотность тепловых потоков конвекции и теплопроводности определяется уравнениями, получаемыми:

$$q_{\text{конв}} = -C_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} u \Delta T \quad \text{и} \quad q_{\text{т}} = -\lambda_{\text{ж}} \frac{\Delta T}{l}.$$

Отношение этих потоков дает «коэффициент конвекции» $\varepsilon_{\text{к}}$ — число, показывающее, во сколько раз эквивалентная теплопроводность движущейся жидкости превышает ее молекулярную теплопроводность. Легко заметить, что в него входят величины, образующие число Пекле:

$$\varepsilon_{\text{к}} = \frac{q_{\text{конв}}}{q_{\text{т}}} = \frac{C_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} u l}{\lambda_{\text{ж}}}. \quad (14)$$

Положив $l = 10^{-2}$ м, находим, что даже при маленькой скорости движения $u = 2^{-5}$ мм/с = 10^{-5} м/с коэффициент конвекции, т.е. конвекционный теплоперенос в 150–400 раз превышает молекулярную теплопроводность нефтепродукта.

Отсюда возникает необходимость в инженерных исследованиях, направленных на снижение скорости охлаждения вязких нефтепродуктов при их перевозках в специализированных цистернах с паробогревательным кожухом. Оно связано с установкой теплоизолирующей оболочки в верхней части котла, над паробогревательным кожухом. Термическое сопротивление оболочки должно быть большим, чем термическое сопротивление воздушного зазора под паробогревательным кожухом, при котором эквивалентный коэффициент теплоотдачи с верхней половины котла цистерны (2) был бы снижен в 50–100 раз. Оболочку можно изготовить из пенополиуретана, нанесенного напылением на верхнюю часть котла.

Пенополиуретаны имеют малые коэффициенты теплопроводности ($\lambda_{\text{из}} = 0,02-0,04$ Вт/м °С) и хорошее (менее 1%) сопротивление усадке. Малая толщина оболочки $\delta \approx 50$ мм не изменит габарита вагона-цистерны с паробогревательным кожухом, ее масса не превысит 100 кг, что также допускается нормами эксплуатации цистерн.

Тонкая оболочка не способна предотвратить полное охлаждение нефтегруза с переходом его в застывшее состояние, она обеспечит лишь его переход в устойчивое стратифицированное состояние с отсутствием ТГК, когда перенос тепла будет определяться молекулярной теплопроводностью.

Режим охлаждения нефтегрузов с ее установкой изменяется. Так как нефтепродукты, как и все органические жидкости, имеют малую теплопроводность, то при охлаждении в стратифицированном состоянии у них застынет и станет высоковязким не все содержимое цистерны, а лишь сравнительно тонкий слой у стенки котла общей массой 5–6 т. Размыв такого слоя при выгрузке цистерны не потребует такого времени, затрат тепловой энергии и труда, как у существующих в настоящее время технологий слива. ■

Литература

1. Бахмат Г.В. Хранение нефти и нефтепродуктов. Тюмень: Вектор, 2002. 536 с.
2. Качурин Л.Г., Морачевский В.Г. Кинетика фазовых переходов воды в атмосфере. Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. 144 с.
3. Мартыненко О.Г., Соковинин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен. Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.