

Как рассчитать перевозку жидких скоропортящихся грузов наливом в режиме "термос"



Когда говорят о скоропортящихся грузах забывают, как правило, что значительную их часть составляют жидкие пищевые продукты, перевозимые наливом. Это всевозможные концентраты для производства соков, вина и виноматериалы, жидкие фракции масел, пивное сусло, молоко и молочное сырье и др. Все эти грузы требуют поддержания определенных температурных условий, установленных в нормативных документах (ГОСТ, ТУ и др.).

Рассмотрим распространенную технологию перевозки таких продуктов, [в режиме "термос"](#), и выведем теоретическую зависимость максимальной продолжительности перевозки груза, в течение которой его температура будет находиться в заданных температурных границах, от влияющих факторов (параметров окружающей среды, кузова транспортного средства, самого груза). Иначе говоря, разберемся как рассчитать предельный срок перевозки жидких наливных грузов в режиме "термос".

Предвосхищаю вопрос - а много ли на железной дороге осталось вагонов-цистерн с термоизолированным котлом? Да, их почти не осталось. Но все, о чем пойдет речь ниже, применимо к танк-контейнерам с термоизолированным котлом, автомобильным специализированным цистернам, а также, что будет наиболее интересным, к перевозкам грузов наливом во флекси-танках. Для тех кто не знает, флекси-танк - это

прочный мешок с насосом для налива груза и устройством для его слива, который размещается в стандартном 20-футовом контейнере.



Флекси-танк во дворе моего института (2005 год)



Устройство налива флекси-танка (2005 год)

Отличия между режимом "термос" для тарно-штучных грузов и перевозимых наливом

Совсем немного теории

Указанные особенности, как уже было сказано, значительно упрощают создание модели теплообменных процессов и расчет предельного срока. Поскольку запись формул представляет определенную сложность в выбранном способе публикации статьи, я решил воспользоваться вордом, а результат представить в виде сканов:

Запишем дифференциальное уравнение теплового баланса для системы «груз – котел транспортного средства – наружный воздух»:

$$\overline{W}_{\text{гр}} \cdot \frac{dt_{\text{гр}}}{d\tau} = K \cdot F \cdot |\overline{t}_{\text{н}} - t_{\text{гр}}|, \quad (1)$$

где

$\overline{W}_{\text{гр}}$ – среднее за грузовой рейс теплоусвоение груза, кДж/К;

K – коэффициент K котла цистерны, Вт/(м²·К);

F – расчетная средняя площадь котла цистерны, м².

После интегрирования уравнения (1) имеем:

$$\int_{t_{\text{гр}0}}^{t_{\text{грн}}} \frac{\overline{W}_{\text{гр}}}{F \cdot |\overline{t}_{\text{н}} - t_{\text{гр}}|} dt_{\text{гр}} = K \cdot \int_0^{\tau_{\text{грн}}^{\text{нал}}} d\tau, \quad (2)$$

где

$t_{\text{гр}0}$ – условная температура груза после окончания налива, °С;

$t_{\text{грн}}$ – предельно допустимая температура груза в конце перевозки, °С;

$\tau_{\text{грн}}^{\text{нал}}$ – предельный срок перевозки груза в режиме «термос», сут.

Условную температуру груза после окончания налива определим как:

$$t_{\text{гр}0} = t_{\text{грн}} + \Delta t_{\text{нал}}, \quad (3)$$

где

$t_{\text{грн}}$ – расчетная температура груза при предъявлении к перевозке, °С;

$\Delta t_{\text{нал}}$ – расчетная величина тепловых потерь груза на этапе погрузки, °С.

Расчетную величину тепловых потерь груза на этапе погрузки ($\Delta t_{\text{нал}}$) определим через тепловое взаимодействие груза и котла цистерны:

$$\Delta t_{\text{нал}} = \frac{(W_{\text{к}} + W_{\text{водл}}^{\text{нал}}) \cdot (t_{\text{н}0} - t_{\text{к}}^{\text{нал}})}{W_{\text{грн}}}, \quad (4)$$

где

W_k – расчетное теплоусвоение котла цистерны, кДж/К;

$W_{\text{возд}}^{\text{нал}}$ – теплоусвоение воздуха, вытесняемого из котла в процессе налива, кДж/К;

$t_k^{\text{нал}}$ – средняя температура котла в процессе налива груза, °С;

$W_{\text{грн}}$ – теплоусвоение груза при предъявлении к перевозке, кДж/К.

Теплоусвоение воздуха, вытесняемого из котла в процессе налива груза, определим как:

$$W_{\text{возд}}^{\text{нал}} = c_{\text{возд}} \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot V, \quad (5)$$

где

$c_{\text{возд}}$ – расчетная теплоемкость насыщенного воздуха (примем $c_{\text{возд}} = 1,038$ кДж/(кг·К));

$\rho_{\text{возд}}$ – расчетная плотность насыщенного воздуха (примем $\rho_{\text{возд}} = 1,205$ кг/м³);

V – расчетный полный объем котла цистерны, м³.

Среднюю температуру котла в процессе налива груза ($t_k^{\text{нал}}$) определим как:

$$t_k^{\text{нал}} = \frac{t_{\text{н0}} + \frac{t_{\text{грн}} + t_{\text{гр0}}}{2}}{2}. \quad (6)$$

Приняв $t_{\text{гр0}} \approx t_{\text{грн}}$:

$$t_k^{\text{нал}} = \frac{t_{\text{н0}} + t_{\text{грн}}}{2}. \quad (7)$$

Предельный срок перевозки груза ($\tau_{\text{терн}}^{\text{нал}}$) получим из решения (2):

$$\tau_{\text{терн}}^{\text{нал}} = \frac{\overline{W}_{\text{гр}}}{24 \cdot 3,6 \cdot K \cdot F} \cdot \ln \left| \frac{t_{\text{гр0}} - \overline{t}_{\text{н}}}{t_{\text{грн}} - \overline{t}_{\text{н}}} \right|. \quad (8)$$

С учетом формул (3)-(7) и сделанных допущений формула (8) примет вид:

$$\tau_{\text{терн}}^{\text{нал}} = \frac{\overline{c}_{\text{гр}} \cdot G_{\text{гр}} \cdot \ln \left| \frac{1}{\overline{t}_{\text{н}} - t_{\text{грн}}} \cdot \left(\overline{t}_{\text{н}} - t_{\text{грн}} - \frac{(W_k + 1,251 \cdot V) \cdot \frac{t_{\text{н0}} - t_{\text{грн}}}{2}}{c_{\text{грн}} \cdot G_{\text{гр}}} \right) \right|}{86,4 \cdot K \cdot F}. \quad (9)$$

Указанная модель довольно упрощенная. В ней, например, температура котла цистерны определяется, прямо скажем, очень грубо. Но смысл данной публикации не в ловле блох (хотя и это вещь полезная), а в демонстрации того, что все подлежит расчету и оценке. А главное, как покажем ниже, это может использоваться на практике шире, чем может показаться.

Пример расчета и практического применения

На практике грузоотправителю нужен не предельный срок перевозки груза, а знать, какие параметры транспортного средства потребовать у оператора, чтобы довезти груз с сохранением качества. А также какие параметры он сам должен соблюдать для этого (например, с какой температурой предъявить груз к погрузке).

Ниже я приведу пример расчета для перевозки виноматериалов, содержащих не менее 24 % спирта по объему, при условии, что груз массой 55 т наливается в вагон-цистерну модели 15-1542 с начальной температурой +5 гр. Цельсия. Перевозка груза осуществляется со станции Орехово-Зуево на станцию Базаиха большой скоростью с датой отгрузки 01 декабря. Определим, какую цистерну (с каким коэффициентом К) мы должны взять, чтобы обеспечить условия сохранения качества груза. Расчет я выполнил в Mathcad v15.0 (на просторах интернета можно скачать, rutracker.org + прокси Вам в помощь), ниже привожу наглядный листинг в виде картинок. А для любителей поиграться с параметрами и посмотреть что будет получаться, даю и [сам файл для среды Mathcad](#).

Имеем:

1) Неупакованный наливом скоропортящийся груз - винои материалы, содержащие менее 24 % спирта по объему (код ЕТСНГ: 591042) - со следующими параметрами:

- масса груза, кг: $G_{гр} := 55000$

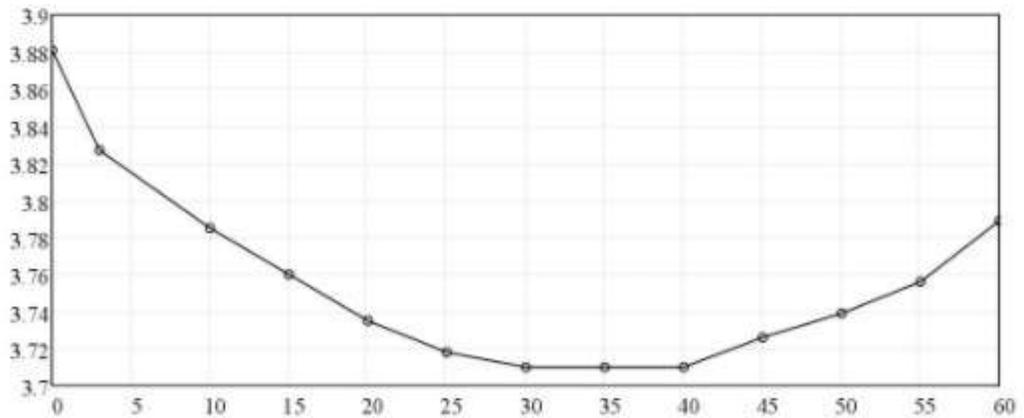
В соответствии с данными заявки грузоотправителя (при отсутствии - в соответствии с классификатором) принимаем его расчетные параметры:

- температурные условия перевозки и хранения [ГОСТ 32030-2013, ГОСТ 32061-2013]:

$t_{грmin} := 5$ $t_{грmax} := 20$

- базов. знан. теплоемк. продукта (температура, °C | теплоемкость, кДж/(кг*К):

$C_{пр} :=$	(0	3.881)
		3	3.827	
		10	3.785	
		15	3.760	
		20	3.735	
		25	3.718	
		30	3.710	
		35	3.710	
		40	3.710	
		45	3.726	
		50	3.739	
		55	3.756	
		60	3.789)



2) Направление перевозок со станции Орехово-Зуево (код ЕСП: 23000) на станцию Базаиса (код ЕСП: 89210) со следующими параметрами:

- срок доставки, сут: $\tau_{дост} := 11$

Дата и время погрузки (предъявления к перевозке): 01.12.2019

3) Транспортное средство: изотермический вагон. В соответствии с классификатором примем, что расчет ведется для грузового вагона модели 15-1542 со следующими расчетными параметрами:

- средняя площадь кузова, м²: $F_{\text{кв}} := 206.8$
- полный объем котла, м³: $V_{\text{кв}} := 54.8$
- расчетное теплосоединение котла, кДж/К: $W_{\text{к}} := 22662$

В соответствии со специальной методикой, определим:

- расчетную температуру наружного воздуха (среднюю за грузовой рейс), °C:

$$t_{\text{н ср}} := -25.2$$

- расчетную температуру наружного воздуха при предъявлении груза к перевозке, °C:

$$t_{\text{н0}} := -20.6$$

Осуществим проверку на необходимость ограничений:

$$t_{\text{н ср}} > t_{\text{трmax}} \vee t_{\text{н ср}} < t_{\text{трmin}} = 1 \quad \Rightarrow \text{необходимо установ. ограничение}$$

Определим температуру груза при предъявлении к перевозке:

$$t_{\text{грн}} := \begin{cases} t_{\text{трmax}} & \text{if } t_{\text{н ср}} < t_{\text{трmin}} \\ t_{\text{трmin}} & \text{otherwise} \end{cases} = 20$$

Определим предельно допустимую температуру груза в конце перевозки:

$$t_{\text{грп}} := \begin{cases} t_{\text{трmin}} & \text{if } t_{\text{н ср}} < t_{\text{трmin}} \\ t_{\text{трmax}} & \text{otherwise} \end{cases} = 5$$

Зададим функцию и определим расчетную среднюю за грузовой рейс удельную теплоемкость груза, кДж/(кг*К):

$$c_{\text{гр ср}} := c \leftarrow \frac{\int_{t_{\text{грп}}}^{t_{\text{грн}}} \text{interp}(c^{(0)}, c^{(1)}, t) dt}{t_{\text{грн}} - t_{\text{грп}}} = 3.773$$

Определим расчетную удельную теплоемкость груза при предъявлении к перевозке, кДж/(кг*К):

$$c_{\text{грн}} := \text{interp}(c^{(0)}, c^{(1)}, t_{\text{грн}}) = 3.735$$

Определим максимально допустимое значение коэффициента К кузова грузового вагона модели 15-1542, сут:

$$K_{\text{кв}} := \frac{c_{\text{гр ср}} \cdot G_{\text{гр}} \cdot \ln \left[\frac{1}{t_{\text{н ср}} - t_{\text{грп}}} \left[t_{\text{н ср}} - t_{\text{грн}} + \frac{(W_{\text{к}} + 1.251 \cdot V) \cdot (t_{\text{н0}} - t_{\text{грп}})}{2} + \frac{c_{\text{грн}} \cdot G_{\text{гр}}}{-c_{\text{грн}} \cdot G_{\text{гр}}} \right] \right]}{86.4 \cdot F \cdot \tau_{\text{дост}}} = 0.37$$

Вывод

На примере показанного расчета видно, насколько важно для обеспечения качества скоропортящегося груза знать теплотехнические параметры транспортного средства. Рефрижераторов это касается, увы, не в меньшей степени (хотя, я знаю, многие ошибочно считают иначе). Кому интересно, что там с рефрижераторами - читаем [тут](#). В общем используем карантин с пользой для саморазвития;-)

