



Европейская экономическая комиссия

Комитет по внутреннему транспорту

**Рабочая группа по перевозкам
скоропортящихся пищевых продуктов**

Семьдесят первая сессия

Женева, 6–9 октября 2015 года

Пункт 6 предварительной повестки дня

Справочник СПС

**Внесение в Справочник СПС положений, касающихся
определения площади внутренней и наружной
теплопередающих поверхностей кузова
железнодорожных вагонов****

Передано Российской Федерацией

РЕЗЮМЕ

Существо предложения:

В соответствии с пунктом 1.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС определение площади внутренней и наружной теплопередающих поверхностей кузова специальных транспортных средств осуществляется с учетом особенностей его конструкции. Однако данное положение СПС никак не конкретизировано с учетом известных особенностей кузова железнодорожных вагонов, что может приводить к использованию экспертами и испытательными станциями СПС неоднозначных методов определения площади внутренней и наружной теплопередающих поверхностей кузова железнодорожного вагона и, как следствие, опасности непризнания выданных свидетельств СПС другими участниками СПС.

Предлагаемое решение:

Используя рассмотренные и в целом одобренные на 70-й сессии Рабочей группы (WP.11) предложения Соединенного Королевства, касающиеся измерения наружной поверхности стен в автомобильных фургонах без окон в грузовом отделении, предложить для внесения в

* Переиздано по техническим причинам 25 сентября 2015 года.

** Настоящий документ был представлен для обработки с опозданием ввиду задержки с получением согласия от соответствующих сторон.

Справочник СПС положений, касающиеся методов определения площади внутренней и наружной теплопередающих поверхностей кузова наиболее распространенных конструкций железнодорожных вагонов, не являющихся цистернами.
Также необходимо внести в базовые предложения Соединенного Королевства исправления в отношении организации, использующей предлагаемые методы определения площади внутренней и наружной теплопередающих поверхностей кузова специальных транспортных средств.

Справочная информация: ECE/TRANS/WP.11/2014/14 и Corr. 1

Введение

1. В соответствии со статьей 3 СПС нормы и требования СПС распространяются на перевозки скоропортящихся пищевых продуктов как автомобильным, так и железнодорожным транспортом. При этом методы и требования к испытаниям и проверкам кузовов и специального оборудования специальных транспортных средств (далее – СТС) одинаковы для автомобильных и железнодорожных СТС.

2. На практике кузова различных СТС могут значительно отличаться по форме, иметь дополнительные конструктивные элементы, требующие учета при испытаниях и экспертных проверках. Зачастую такие конструктивные особенности очень трудно учесть в полном объеме.

В отдельных случаях к испытаниям могут предъявляться СТС, у которых невозможно точно установить конструкцию кузова по разным причинам.

3. На 70-й сессии WP.11 были рассмотрены предложения Соединённого Королевства, касающиеся методов определения наружной поверхности кузова автомобильных фургонов без окон в грузовом отделении. По итогам обсуждения Рабочая группа предложила включить предложения Соединенного Королевства в Справочник СПС.

4. В ходе обсуждения предложений Соединенного Королевства специалисты Российской Федерации высказали мнение о необходимости использования одинаковых методов для определения площади наружной поверхности кузова как автомобильных, так и железнодорожных СТС.

Российская Федерация выступила с инициативой рассмотреть применимость методов определения площади наружной поверхности автомобильных фургонов без окон в грузовом отделении, предложенных Соединенным Королевством, к наиболее распространенным конструкциям кузова железнодорожных вагонов, не являющихся цистернами. По итогам этого рассмотрения сформулировать соответствующие предложения для внесения в Справочник СПС.

5. В связи с вышеизложенным, Российская Федерация подготовила предложения по внесению в Справочник СПС соответствующих положений в форме официального документа.

Внимательное изучение образца протокола испытания № 1А, в котором приводятся данные по площади поверхностей стенок кузова СТС, выявило достаточность его формы (с учетом примечания 5) поставленной задаче конкретизации методов определения площади внутренней и наружной теплопередающих поверхностей кузова СТС.

За основу взяты действующая на момент подготовки данного официального документа редакция Справочника СПС на русском языке (2014 г.), а также предложения Соединенного Королевства, изложенные в документе ECE/TRANS/WP.11/2014/14. Данные предложения Соединенного Королевства Российская Федерация приводит целиком в части, касающейся автомобильных фургонов без окон в грузовом отделении, с изменениями в отношении организации, использующей предлагаемые методы определения площади внутренней и наружной теплопередающих поверхностей кузова специальных транспортных средств, и дополняет их (выделено жирным шрифтом) соответствующими положениями, касающимися распространенных конструкций кузовов железнодорожных вагонов, не являющихся цистернами. При этом с целью экономии места в настоящем официальном документе Российская Федерация не приводит чертежи и примеры расчетов, касающиеся автомобильных фургонов без окон в грузовом отделении.

Предложения

6. Добавить в Справочник СПС комментарий к пункту 1.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС в следующей редакции:

«Для расчета средней поверхности кузова автомобилей-фугов без окон в грузовом отделении назначенные или уполномоченные компетентными органами испытательные станции ~~эксперты~~ выбирают один метод или комбинацию из следующих трех методов.

Метод А. Изготовитель предоставляет чертежи и расчеты, относящиеся к внутренним, S_i , и наружным, S_e , поверхностям кузова.

Площади внутренней и наружной поверхностей кузова определяются с учетом проекций конкретных конструктивных особенностей кузова, например, изгибов, гофр, арок колес и т.д.

Метод В. Изготовитель предоставляет чертежи, а ~~компетентные органы~~ испытательные станции используют расчеты в соответствии со схемами и формулами, приведенными на рис. 1, 2 или 3, а также рис. 4 и 5. При этом:

$$S_i = [(WI \cdot LI) + (WI \cdot LI) + (W_i \cdot W_i)] \cdot 2$$

$$S_e = [(WE \cdot LE) + (WE \cdot LE) + (W_e \cdot W_e)] \cdot 2$$

где:

WI – ось Y внутренней поверхности,

LI – ось X внутренней поверхности,

W_i – ось Z внутренней поверхности,

WE – ось Y наружной поверхности,

LE – ось X наружной поверхности,

W_e – ось Z наружной поверхности.

Метод С. Если ни один из указанных методов не является для экспертов приемлемым, внутренняя поверхность измеряется в соответствии с рисунками и формулами, указанными для метода В.

В этом случае значение коэффициента K рассчитывается на основе площади внутренней поверхности S_i , при этом среднюю толщину изоляции, d , принимают за нулевую. При таком значении коэффициента K средняя толщина изоляции рассчитывается исходя из предположения, что коэффициент теплопроводности, λ , для изоляции имеет значение, равное $0,025 \text{ Вт/(м·К)}$:

$$d = \frac{S_i \cdot \Delta T \cdot \lambda}{W}$$

После определения толщины изоляции рассчитывается площадь наружной поверхности и определяется средняя поверхность. Окончательное значение коэффициента K выводится методом последовательной итерации.

...

<рис. 1, 2, 3, 4, 5>

...

Вышеуказанные методы могут также применяться для других СТС, в частности для расчета кузовов железнодорожных вагонов, не являющихся цистернами, представляющих собой крытый кузов со скругленной крышей. В этом случае следует использовать схемы, приведенные на рис. 6, а расчет площадей внутренней и наружной поверхностей кузова вагона производить в соответствии со следующими формулами:

$$S_i = L_i \cdot B_i + 2 \cdot (L_i + B_i) \cdot H_i + L_i \cdot \frac{P_i}{2} + \pi \cdot \frac{B_i}{2} \cdot (HH_i - H_i)$$

$$S_e = L_e \cdot B_e + 2 \cdot (L_e + B_e) \cdot H_e + L_e \cdot \frac{P_e}{2} + \pi \cdot \frac{B_e}{2} \cdot (HH_e - H_e)$$

$$P_i = 4 \cdot \left(\left(\frac{B_i}{2} \right)^x + (HH_i - H_i)^x \right)^{\frac{1}{x}}$$

$$P_e = 4 \cdot \left(\left(\frac{B_e}{2} \right)^x + (HH_e - H_e)^x \right)^{\frac{1}{x}}$$

$$x = \frac{\ln 2}{\ln \frac{\pi}{2}}$$

где:

P_i, P_e – длина периметра эллипса, в виде которого математически представлено скругление крыши железнодорожного вагона крытого типа, м^2 .

Рис. 6

Расчетная схема кузова железнодорожного вагона со скругленной крышей»



Примеры расчетов

7. Примеры расчетов, выполненные в среде MathCAD, приведены в приложениях А и Б к настоящему официальному документу.

Обоснование

8. Исправления в предложения Соединенного Королевства, касающиеся организации, использующей предлагаемые методы определения площади внутренней и наружной теплопередающих поверхностей кузова специальных транспортных средств, необходимо внести с целью приведения данных предложений Соединенного Королевства в соответствие с общими требованиями СПС.

9. Конкретизация методов определения теплопередающей поверхности кузова ТС, включая его внешнюю и внутреннюю поверхности, представляется важной задачей для обеспечения единого понимания норм и требований СПС всеми Договаривающимися сторонами, экспертами и испытательными станциями. В условиях использования единых, понятных и доступных методов измерения теплопередающей поверхности ТС степень взаимного доверия к выданным свидетельствам СПС будет возрастать, что благотворно скажется на функционировании всей системы контроля и освидетельствования ТС в целом.

10. Решение поставленной задачи определения теплопередающей поверхности кузова ТС должно также способствовать реализации основной цели СПС – сохранению качества и безопасности скоропортящихся пищевых продуктов при перевозках.

11. В отношении ТС, кузов которого имеет сложную форму или конструкция которого не содержит достаточного технического описания, обозначенный выше подход подразумевает определение площади теплопередающей поверхности ТС таким образом, чтобы вычисленное с его помощью значение коэффициента К не было ниже реального значения.

Очевидно, расчетная теплопередающая поверхность должна, в таком случае, соответствовать минимальному значению, что в свою очередь, должно соответствовать минимальной расчетной толщине изоляции, напрямую зависящей от

значения коэффициента теплопроводности материалов, из которых выполнены изолирующие поверхности кузова ТС.

В настоящее время для теплоизоляции кузовов ТС часто используется пенополиуретан, обладающий наиболее низким значением коэффициента теплопроводности по сравнению с остальными известными теплоизоляционными материалами, используемыми в кузовах ТС. В специальной литературе указано, что промышленно изготавливаемые пенополиуретаны могут иметь коэффициент теплопроводности до 0,019 Вт/(м·К). Однако в реальных условиях (температура, влажность, условия изготовления и нанесения пенополиуретана на поверхности кузова) это значение редко бывает ниже 0,023-0,025 Вт/(м·К), в том числе у новых железнодорожных вагонов, а в процессе эксплуатации по мере старения и увлажнения пенополиуретана значительно возрастает. Таким образом, расчетное значение коэффициента теплопроводности, 0,025 Вт/(м·К), предложенное Соединенным Королевством в документе ECE/TRANS/WP.11/2014/14, представляется допустимым и целесообразным как для автомобильных ТС, так и для железнодорожных вагонов.

12. Принимая во внимание известную формулу для теоретического определения значения коэффициента теплопередачи (без учета конвекции и излучения), расчетное значение средней толщины изоляции, d , может быть определено из следующего равенства:

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{W}{\Delta T \cdot S}$$

где:

α_e , α_i – соответствующие расчетные значения коэффициента теплоотдачи от наружной и внутренней поверхностей кузова ТС (теплоотдача незначительно влияет на значение коэффициента K и в практических расчетах ею можно пренебречь);

$\lambda = 0,025$ Вт/(м·К) – расчетное значение коэффициента теплопроводности;

S , в данном случае, следует определять как:

$$S = \sqrt{S_i \cdot S_e} = \sqrt{S_i \cdot f(S_i, d)}$$

Расчетная площадь наружной теплопередающей поверхности кузова ТС определяется по формулам, приведенным в предложении Соединенного Королевства (ECE/TRANS/WP.11/2014/14), а также в настоящем документе, при условии, что все расчетные наружные размеры кузова увеличиваются на величину расчетной средней толщины изоляции.

Значение средней толщины изоляции может быть получено, как уже было сказано выше, решением уравнения, приведенного в пункте 11 настоящего документа. Однако, в случае сложной поверхности кузова, а также невозможности реализовать численные методы решения подобных уравнений, более простым способом решения является метод последовательных итераций («метод С» в предложении Соединенного Королевства). При этом необходимое количество итераций должно соответствовать точности определения искомой величины (в случае определения d эта точность должна составлять 0,001 м).

Издержки

13. Дополнительные издержки отсутствуют. Конкретизация методов определения площади внутренней и наружной теплопередающих поверхностей кузова железнодорожных вагонов, не являющихся цистернами, не подразумевает использования дополнительных инструментальных средств, сложных математических расчетов или иных затратных процедур.

Практическая осуществимость

14. Предлагаемые изменения создают лучшие условия для реализации основных целей и задач СПС без дополнительных издержек и необходимости введения переходного периода, а также повышают степень взаимного доверия Договаривающихся сторон СПС.

Возможность обеспечения применения

15. Не предвидится никаких проблем с испытаниями и экспертными проверками.

Приложение А

Определение площади наружной поверхности кузова железнодорожного вагона (на примере нового вагона-термоса производства завода Дессау, Германия, № 80000011, 1985 г.)

Исходные данные

Наружные размеры кузова вагона (в соответствии с технической документацией на вагоны модели ТН 4-201-90):

длина, м: $Le := 21.000$

ширина, м: $Be := 3.094$

высота по боковой стенке, м: $He := 2.763$

высота по продольной оси, м: $HHe := 3.610$

Внутренние размеры кузова вагона (в соответствии с технической документацией на вагоны модели ТН 4-201-90):

длина, м: $Li := 20.596$

ширина, м: $Bi := 2.702$

высота по боковой стенке, м: $Hi := 2.550$

высота по продольной оси, м: $HHi := 3.195$

Расчетный коэффициент теплоотдачи внутренних стен кузова, Вт/(м²К): $\alpha_i := \infty$

Расчетный коэффициент теплоотдачи наружных стен кузова, Вт/(м²К): $\alpha_e := \infty$

Примечание: данный параметр незначительно влияет на результат расчетов и для простоты проигнорирован

Значения параметров за время режима устойчивого состояния:

среднее значение потребляемой электрической мощности, Вт: $W := 1080$

средний перепад температур внутри и снаружи кузова вагона, °С: $\Delta T := 25$

Расчетное значение коэффициента теплопроводности изоляции кузова, Вт/(мК):

$\lambda := 0.025$

Расчет по методу "А":

Площадь теплопередающей поверхности кузова вагона (определена при испытаниях), м²: $F_A := 252.5$

Функция для вычисления значения коэффициента К: $fK(W, \Delta T, F) := \frac{W}{F \cdot \Delta T}$

Значение коэффициента К, Вт/(м²К): $coefK_A := fK(W, \Delta T, F_A) = 0.171$

Расчет по методу "В":

Определение периметра скругления крыши вагона:

Примечание: ниже приведена приближенная формула для вычисления периметра скругления крыши вагона из предположения его эллиптической формы. Максимальная погрешность этой формулы ~0.3619 % при эксцентриситете эллипса ~0.979811 (соотношение осей ~1/5). Погрешность всегда положительная.

$$x := \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{\pi}{2}\right)}$$

Эмпирический параметр:

Функция для вычисления периметра скругления крыши вагона:

$$fP(B, H, HH) := 4 \left[\left(\frac{B}{2} \right)^x + (HH - H)^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

Функция для вычисления площади кузова вагона:

$$fF(L, B, H, HH) := L \cdot B + 2 \cdot (L + B) \cdot H + L \cdot \frac{fP(B, H, HH)}{2} + \pi \cdot \frac{B}{2} \cdot (HH - H)$$

Функция для вычисления площади расчетной теплопередающей поверхности кузова вагона:

$$fF(Le, Be, He, HHe, Li, Bi, Hi, HHi) := \sqrt{fF'(Le, Be, He, HHe) \cdot fF'(Li, Bi, Hi, HHi)}$$

Площадь теплопередающей поверхности кузова вагона, м²:

$$F_B := fF(Le, Be, He, HHe, Li, Bi, Hi, HHi) = 262.749$$

Площадь наружной поверхности кузова вагона, м²:

$$F_e := fF'(Le, Be, He, HHe) = 283.008$$

Значения коэффициента К, Вт/(м²К): coefK_B := fK(W, ΔT, F_B) = 0.164

Расчет по методу "С":

```

proc(Li, Bi, Hi, HHi, W, ΔT, λ, αe, αi) :=
  prec ← 0.001
  n ← 0
  Dn ← 0
  LEn ← Li + 2·Dn
  BEn ← Bi + 2·Dn
  HEn ← Hi + Dn
  HHEn ← HHi + 2·Dn
  FEn ← fF(LEn, BEn, HEn, HHEn)
  coefK_Cn ←  $\frac{W}{\Delta T \cdot fF(LE_n, BE_n, HE_n, HHE_n, Li, Bi, Hi, HHi)}$ 
  Δd ← ∞
  while Δd > prec
    n ← n + 1
    Dn ←  $\left( \frac{\Delta T \cdot fF(LE_{n-1}, BE_{n-1}, HE_{n-1}, HHE_{n-1}, Li, Bi, Hi, HHi)}{W} - \frac{1}{\alpha_e} - \frac{1}{\alpha_i} \right) \lambda$ 
    LEn ← Li + 2·Dn
    BEn ← Bi + 2·Dn
    HEn ← Hi + Dn
    HHEn ← HHi + 2·Dn
    FEn ← fF(LEn, BEn, HEn, HHEn)
    coefK_Cn ←  $\frac{W}{\Delta T \cdot fF(LE_n, BE_n, HE_n, HHE_n, Li, Bi, Hi, HHi)}$ 
    Δd ← |Dn - Dn-1|
  return (D LE BE HE HHE FE coefK_C)

```

Список дополнительных переменных:

$prec=10^{-3}m$ -точность подбора средней толщины изоляции;

n -номер итерации, начиная с 0 (особенность индексации массивов в MathCAD);

D_n -средняя толщина изоляции, полученная в итерации n , м;

LE_n -расчетная наружная длина кузова вагона, полученная в итерации n , м;

BE_n -то же, ширина, м;

HE_n -то же, высота по боковой стенке, м;

HHE_n -то же, высота по продольной оси, м;

FE_n -расчетная площадь наружной поверхности кузова вагона, полученная в итерации n , м²;

$coefK_{C_n}$ -расчетное значение коэффициента K , полученное в итерации n методом С, Вт/(м²К);

Δd -модуль абсолютного изменения средней толщины изоляции, м ($\Delta d > prec$).

Итоги подбора параметров (столбцы: D | LE | BE | HE | HHE | FE | coefK_C) в итерациях (строки):

$$\text{proc}(\text{Li}, \text{Bi}, \text{Hi}, \text{HHi}, \text{W}, \Delta\text{T}, \lambda, \alpha_e, \alpha_i) = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 0.000 \\ 0.141 \\ 0.149 \\ 0.149 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 20.596 \\ 20.878 \\ 20.894 \\ 20.894 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.702 \\ 2.984 \\ 3.000 \\ 3.000 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.550 \\ 2.691 \\ 2.699 \\ 2.699 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 3.195 \\ 3.477 \\ 3.493 \\ 3.493 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 243.940 \\ 271.067 \\ 272.561 \\ 272.641 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0.177 \\ 0.168 \\ 0.168 \\ 0.168 \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

Определение средней толщины изоляции по методу "D":

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{W}{\Delta\text{T} \cdot f(\text{Li} + 2 \cdot d, \text{Bi} + 2 \cdot d, \text{Hi} + d, \text{HHi} + 2 \cdot d, \text{Li}, \text{Bi}, \text{Hi}, \text{HHi})} \text{ solve} \rightarrow 0.14924416242198620967$$

Приложение Б

Определение площади наружной поверхности кузова железнодорожного вагона (на примере испытаний вагона № 80007990, осуществленного в апреле 2015 г)

Исходные данные

Наружные размеры кузова вагона (в соответствии с технической документацией на вагоны модели 11-280):

длина, м: $\overline{Le} := 15.750$

ширина, м: $\overline{Be} := 2.790$

высота по боковой стенке, м: $\overline{He} := 2.915$

высота по продольной оси, м: $\overline{HHe} := 3.323$

Внутренние размеры кузова вагона (по результатам обмера несколькими измерениями кузова вагона № 80007990):

длина, м: $\overline{Li} := (15.340 \ 15.340)$ $Li := \text{mean}(Li) = 15.340$

ширина, м: $\overline{Bi} := (2.470 \ 2.470)$ $\overline{Bi} := \text{mean}(Bi) = 2.470$

высота по боковой стенке, м: $\overline{Hi} := (2.635 \ 2.635 \ 2.630 \ 2.620)$ $Hi := \text{mean}(Hi) = 2.630$

высота по продольной оси, м: $\overline{HHi} := (2.900 \ 2.900)$ $HHi := \text{mean}(HHi) = 2.900$

Расчетный коэффициент теплоотдачи внутренних стен кузова, Вт/(м²К): $\overline{\alpha_i} := \infty$

Расчетный коэффициент теплоотдачи наружных стен кузова, Вт/(м²К): $\overline{\alpha_e} := \infty$

Примечание: данный параметр незначительно влияет на результат расчетов и для простоты проигнорирован

Значения параметров за время режима устойчивого состояния:

среднее значение потребляемой электрической мощности, Вт: $\overline{W} := 1627$

средняя температура внутри кузова вагона, °C: $\overline{Ti} := 35.7$

средняя температура снаружи кузова вагона, °C: $\overline{Te} := 10.3$

средний перепад температур внутри и снаружи кузова вагона, °C:

$$\Delta T := \text{round}(Ti - Te, 1) \quad \Delta T = 25.4$$

Расчетное значение коэффициента теплопроводности изоляции кузова, Вт/(мК):

$$\overline{\lambda} := 0.025$$

Расчет по методу "В":

Определение периметра скругления крыши вагона:

Примечание: ниже приведена приближенная формула для вычисления периметра скругления крыши вагона из предположения его эллиптической формы. Максимальная погрешность этой формулы ~0.3619 % при эксцентриситете эллипса ~0.979811 (соотношение осей ~1/5). Погрешность всегда положительная.

$$x := \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{\pi}{2}\right)}$$

Эмпирический параметр:

Функция для вычисления периметра скругления крыши вагона:

$$fP(B, H, HH) := 4 \left[\left(\frac{B}{2} \right)^x + (HH - H)^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

Функция для вычисления площади кузова вагона:

$$fF(L, B, H, HH) := L \cdot B + 2 \cdot (L + B) \cdot H + L \cdot \frac{fP(B, H, HH)}{2} + \pi \cdot \frac{B}{2} \cdot (HH - H)$$

Функция для вычисления площади расчетной теплопередающей поверхности кузова вагона:

$$fF(Le, Be, He, HHe, Li, Bi, Hi, HHi) := \sqrt{fF'(Le, Be, He, HHe) \cdot fF'(Li, Bi, Hi, HHi)}$$

$$F_{xx} := fF(Le, Be, He, HHe, Li, Bi, Hi, HHi) = 186.860$$

Площадь наружной поверхности кузова вагона, м²: $F_e := fF'(Le, Be, He, HHe) = 201.992$

Функция для вычисления значения коэффициента К: $fK(W, Ti, Te, F) := \frac{W}{F \cdot (Ti - Te)}$

Значение коэффициента К, Вт/(м²К): $coefK_B := fK(W, Ti, Te, F) = 0.343$

Расчет по методу "С":

```

proc(Li, Bi, Hi, HHi, W, ΔT, λ, αe, αi) :=
  prec ← 0.001
  n ← 0
  Dn ← 0
  LEn ← Li + 2·Dn
  BEn ← Bi + 2·Dn
  HEn ← Hi + Dn
  HHEn ← HHi + 2·Dn
  FEn ← fF(LEn, BEn, HEn, HHEn)
  coefK_Cn ←  $\frac{W}{\Delta T \cdot fF(LE_n, BE_n, HE_n, HHE_n, Li, Bi, Hi, HHi)}$ 
  Δd ← ∞
  while Δd > prec
    n ← n + 1
    Dn ←  $\left( \frac{\Delta T \cdot fF(LE_{n-1}, BE_{n-1}, HE_{n-1}, HHE_{n-1}, Li, Bi, Hi, HHi)}{W} - \frac{1}{\alpha_e} - \frac{1}{\alpha_i} \right) \cdot \lambda$ 
    LEn ← Li + 2·Dn
    BEn ← Bi + 2·Dn
    HEn ← Hi + Dn
    HHEn ← HHi + 2·Dn
    FEn ← fF(LEn, BEn, HEn, HHEn)
    coefK_Cn ←  $\frac{W}{\Delta T \cdot fF(LE_n, BE_n, HE_n, HHE_n, Li, Bi, Hi, HHi)}$ 
    Δd ← |Dn - Dn-1|
  return (D LE BE HE HHE FE coefK_C)

```

Список дополнительных переменных:

$prec = 10^{-3} m$ -точность подбора средней толщины изоляции;

n -номер итерации, начиная с 0(особенность индексации массивов в MathCAD);

D_n -средняя толщина изоляции, полученная в итерации n , м;

LE_n -расчетная наружная длина кузова вагона, полученная в итерации n , м;

BE_n -то же, ширина, м;

HE_n -то же, высота по боковой стенке, м;

HHE_n -то же, высота по продольной оси, м;

FE_n -расчетная площадь наружной поверхности кузова вагона, полученная в итерации n , м²;

$coefK_{C_n}$ -расчетное значение коэффициента K , полученное в итерации n методом С, Вт/(м²К);

Δd -модуль абсолютного изменения средней толщины изоляции, м ($\Delta d > prec$).

Итоги подбора параметров (столбцы: D | LE | BE | HE | HHE | FE | coefK_C) в итерациях (строки):

$$\text{proc}[Li, Bi, Hi, HHi, W, (Ti - Te), \lambda, \alpha_e, \alpha_i] = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 0.000 \\ 0.067 \\ 0.069 \\ 0.069 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 15.340 \\ 15.475 \\ 15.479 \\ 15.479 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.470 \\ 2.605 \\ 2.609 \\ 2.609 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.630 \\ 2.697 \\ 2.699 \\ 2.699 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.900 \\ 3.035 \\ 3.039 \\ 3.039 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 172.862 \\ 182.778 \\ 183.062 \\ 183.070 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0.371 \\ 0.360 \\ 0.360 \\ 0.360 \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

Определение средней толщины изоляции по методу "D":

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{W}{\Delta T \cdot f(Li + 2 \cdot d, Bi + 2 \cdot d, Hi + d, HHi + 2 \cdot d, Li, Bi, Hi, HHi)} \text{ solve} \rightarrow 0.06942964466300804229$$