



Европейская экономическая комиссия

Комитет по внутреннему транспорту

Рабочая группа по перевозкам скоропортящихся пищевых продуктов

Семьдесят четвертая сессия

Женева, 8–12 октября 2018 года

Пункт 6 а) предварительной повестки дня

Предложение по поправкам к СПС:

предложения, по которым еще не приняты решения

Уточнения в СПС относительно замены погрешности измерения общего коэффициента теплопередачи кузова специального транспортного средства (далее – коэффициент К) на неопределенность, а также в Справочник СПС относительно рекомендуемых методов нахождения неопределенности измерения коэффициента К

Передано Российской Федерацией

Резюме

Существо предложения:

В пункте 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС указано максимальное значение погрешности при измерении общего коэффициента теплопередачи (далее – коэффициент К) кузова специального транспортного средства (далее – ТС).

В настоящее время в научном сообществе принято говорить не о погрешности измерений, то есть не о максимально возможной ошибке определения истинного значения измеряемой физической величины, которое никогда не может быть достоверно известно, а о неопределенности, которая устанавливает с заданной вероятностью границы интервала, в котором могут находиться значения измеряемой величины.

Предлагаемое решение:	<p>Использование в СПС понятия погрешности измерения связано с временем, когда понятия погрешности и неопределенности измерений еще не были достаточно разграничены. В настоящее время должны быть приложены усилия к замене погрешности на неопределенность, чтобы СПС в полной мере соответствовало текущему уровню развития науки</p> <p>Изменить редакцию пункта 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС положениями, касающимися точности измерения коэффициента K, исходя из представлений о неопределенности, а не о погрешности конечного результата измерений. Внести соответствующие изменения в образцы протоколов испытаний №№ 2 А и 2 В, содержащихся в СПС.</p> <p>Уточнить комментарий к пункту 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 Справочника СПС.</p>
Справочная информация:	<p>ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения» (ISO/IES Guide 98-3:2008 «Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) (IDT)</p>

Введение

1. На 71-й сессии WP.11 специалистами Российской Федерации было отмечено, что в методике испытаний, приведенной в СПС, отсутствуют четкие указания по расчету погрешности измерения коэффициента K .
2. На 72-й сессии WP.11 Российская Федерация подготовила предложения по внесению в СПС и Справочник СПС соответствующих положений относительно формы погрешности измерения коэффициента K и методики расчета этой погрешности, исходя из определенной математической модели проведения испытаний (документ ECE/TRANS/WP.11/2016/4).
3. Во время обсуждения на 72-й сессии WP.11 документа ECE/TRANS/WP.11/2016/4 специалист Франции отметил актуальность использования в настоящее время понятия неопределенности измерения, вместо погрешности. Учитывая определенную схожесть математических методов определения погрешности и неопределенности измерения и, как следствие, количественной оценки неточности измерения коэффициента K , предложение Российской Федерации было принято.
4. В процессе подготовки к 73-й сессии WP.11 специалисты Российской Федерации внимательно изучили замечания Франции по документу ECE/TRANS/WP.11/2016/4, которые были любезно предоставлены российским специалистам в рабочем порядке. Также было изучено Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, которое в Российской Федерации переведено на русский язык и фигурирует в качестве национального стандарта ГОСТ Р 54500.3-2011. Результатом проделанной работы стало солидарное со специалистами Франции мнение о целесообразности использования в СПС именно понятия неопределенности измерения коэффициента K вместо погрешности и подготовка Российской Федерацией соответствующих изменений в СПС и Справочник СПС.

5. Несмотря на то, что предыдущее предложение Российской Федерации по данному вопросу (документ ECE/TRANS/WP.11/2016/4) было принято на 72-й сессии WP.11 в части комментария к пункту 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 в Справочнике СПС, но касалось методики расчета погрешности измерения коэффициента К, на 73-й сессии WP.11 предлагается принять новую редакцию комментария к пункту 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 в Справочнике СПС, где изменения касаются уже использования неопределенности измерения коэффициента К вместо погрешности. Также предлагается внести соответствующие правки в пункт 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС, а также в образцы протоколов испытаний №№ 2 А и 2 В.

6. Для удобства восприятия новых поправок они вносятся в актуальные редакции СПС (с поправками по состоянию на 19 декабря 2016 г.), а также актуальная редакция Справочника СПС (с сайта ЕЭК ООН по состоянию на 05 июня 2017 г.

Предложения

7. Представить пункт 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС в следующей редакции¹:

«2.3.2 Точность измерений коэффициента К

Испытательные станции должны быть оснащены необходимым оборудованием и приборами, обеспечивающими возможность определения коэффициента К с ~~максимальной погрешностью измерения расширенной неопределенностью~~ не более $\pm 10\%$ при использовании метода внутреннего охлаждения и $\pm 5\%$ при использовании метода внутреннего нагревания. При расчете расширенной неопределенности измерения коэффициента К уровень доверия должен быть принят не менее 95 %.»

8. Представить в Справочнике СПС комментарий к пункту 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС в следующей редакции²:

«Комментарии к пункту 2.3.2:

1. Испытательные станции обычно учитывают ~~погрешности неопределенности~~ значений таких параметров, как температура, энергия тепловая мощность (или холодопроизводительность) и площадь поверхности кузова.

~~Для определения погрешности обычно используется метод общей допустимой погрешности ϵ :~~

$$\epsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\Delta T}{T_e - T_t}\right)}$$

~~или абсолютной погрешности ϵ_m :~~

$$\epsilon_m = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta W}{W} + 2 \cdot \frac{\Delta T}{T_e - T_t}$$

¹ Здесь и далее добавляемые фрагменты текста выделены подчеркиванием, удаляемые – зачеркиванием; исходное форматирование во всех случаях сохранено

² Блоки добавляемых формул, включая описание их аргументов, по причине визуального восприятия не выделены подчеркиванием

где:

S — средняя площадь поверхности кузова транспортного средства (средняя геометрическая внутренней и наружной поверхностей);

W — количество энергии, поглощенной внутри кузова транспортного средства при постоянных условиях;

T_e и T_i — соответственно наружная и внутренняя температуры кузова испытываемого транспортного средства.

Расширенная неопределенность измерения коэффициента K , $U(K)$, может быть получена с использованием рекомендаций, изложенных в п. 6.3.3 Руководства ИСО/МЭК 98-3:2008. В этом случае:

$$U(K) = k \cdot u_c(K)$$

где

k — коэффициент охвата для выбранного уровня доверия (для уровня доверия 95 % может быть принят равным 2; 99 % – 3);

$u_c(K)$ — суммарная стандартная неопределенность измерения коэффициента K .

Суммарная стандартная неопределенность измерения коэффициента K представляет собой оценку стандартного отклонения коэффициента K и характеризует разброс значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны величине коэффициента K .

Поскольку коэффициент K определяется на основании функциональной зависимости, включающей в качестве аргументов такие физические величины как тепловая мощность (или холодопроизводительность) теплообменников, наружная и внутренняя температуры кузова, площадь средней поверхности кузова, которые в свою очередь измеряются также с некоторой стандартной неопределенностью, суммарная стандартная неопределенность измерения коэффициента K может быть рассчитана на основании закона трансформирования неопределенностей, приведенного в разделе 5 Руководства ИСО/МЭК 98-3:2008, с учетом корреляции (во времени) наружной и внутренней температур кузова, а также тепловой мощности (или холодопроизводительности) и внутренней температуры кузова:

$$u_c(K) = \sqrt{\frac{\left(\frac{u_c(W)}{\bar{S} \cdot (\bar{T}_e - \bar{T}_i)}\right)^2 + \left(\frac{\bar{W} \cdot u_c(S)}{\bar{S}^2 \cdot (\bar{T}_e - \bar{T}_i)}\right)^2 + \dots}{\bar{W}^2 \cdot (u_c(T_i)^2 + u_c(T_e)^2 + 2 \cdot r(T_e, T_i) \cdot u_c(T_e) \cdot u_c(T_i)) + \dots} + \frac{2 \cdot \bar{W} \cdot r(W, T_i) \cdot u_c(W) \cdot u_c(T_i)}{\bar{S}^2 \cdot (|\bar{T}_e - \bar{T}_i|)^3}}$$

где

\bar{W} , \bar{T}_e , \bar{T}_i , \bar{S} — рассчитанные средние значения, соответственно, тепловой мощности (или холодопроизводительности), Вт; наружной и внутренней температур кузова, °C; площади средней поверхности кузова, м²;

$u_c(W)$, $u_c(T_i)$, $u_c(T_e)$, $u_c(S)$ – суммарные стандартные неопределенности измерения, соответственно, тепловой мощности (или холодопроизводительности), Вт, наружной и внутренней температур кузова, °С, площади средней поверхности кузова, м²;

$r(T_e, T_i)$, $r(W, T_i)$ – коэффициенты корреляции, соответственно, векторов значений наружной и внутренней температур кузова, а также тепловой мощности (или холодопроизводительности) и внутренней температуры кузова.

Коэффициент корреляции может быть вычислен как линейный коэффициент корреляции (коэффициент корреляции Пирсона). Однако следует учитывать, что изменение значений в векторах тепловой мощности (или холодопроизводительности) и, особенно, наружной температуры кузова приводит к соответствующим изменениям в векторе внутренней температуры кузова с некоторым смещением (запаздыванием) во времени. Данное смещение во времени объясняется процессами теплообмена в системе «воздух внутри транспортного средства – теплоизоляция – окружающая среда», и в случае изменения наружной температуры кузова может достигать нескольких часов. Имеющееся смещение во времени может быть установлено либо визуально (на основании зрительного анализа графиков изменяющихся величин), либо путем выбора максимального значения линейного коэффициента корреляции при последовательном переборе вариантов смещения вектора внутренней температуры.

Суммарные стандартные неопределенности измерения тепловой мощности (или холодопроизводительности), наружной и внутренней температур кузова могут быть определены с учетом рекомендаций, приведенных в разделах 4 и 5 Руководства ИСО/МЭК 98-3:2008, по следующим формулам:

$$u_c(W) = \sqrt{u_A(\bar{W})^2 + u_B(W)^2} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (W_k - \bar{W})^2}{n \cdot (n - 1)} + u_B(W)^2}$$

$$u_c(T_i) = \sqrt{u_A(\bar{T}_i)^2 + u_A(\bar{T}_i)^2 + u_B(T_i)^2} = \sqrt{\max_{1 \leq k \leq n} \left(\frac{\sum_{i=1}^l (T_{i,i,k} - \bar{T}_{i,k})^2}{l \cdot (l - 1)} \right) + \dots + \frac{\sum_{k=1}^n (\bar{T}_{i,k} - \bar{T}_i)^2}{n \cdot (n - 1)} + \dots + u_B(T_i)^2}$$

$$u_c(T_e) = \sqrt{u_A(\bar{T}_e)^2 + u_A(\bar{T}_e)^2 + u_B(T_e)^2} = \sqrt{\max_{1 \leq k \leq n} \left(\frac{\sum_{j=1}^m (T_{e,j,k} - \bar{T}_{e,k})^2}{m \cdot (m - 1)} \right) + \dots + \frac{\sum_{k=1}^n (\bar{T}_{e,k} - \bar{T}_e)^2}{n \cdot (n - 1)} + \dots + u_B(T_e)^2}$$

$$u_c(S) = \sqrt{\frac{(\bar{S}_i \cdot u_c(S_e))^2 + (\bar{S}_e \cdot u_c(S_i))^2}{4 \cdot \bar{S}_e \cdot \bar{S}_i}}$$

где:

$u_A(\bar{W})$, $u_A(\bar{T}_i)$, $u_A(\bar{T}_e)$, $u_A(\bar{T}_{i,k})$, $u_A(\bar{T}_{e,k})$ – стандартные неопределенности измерения средних значений, соответственно, тепловой мощности (или холодопроизводительности), Вт, внутренней и наружной температур кузова (в пределах одного замера на основании одновременных показаний 12 приборов для измерения температуры), К, внутренней и наружной температур кузова (в границах периода устойчивого состояния), К, оцененных по типу А;

$u_B(W)$, $u_B(T_i)$, $u_B(T_e)$ – стандартные неопределенности измерения, соответственно, тепловой мощности (или холодопроизводительности), Вт, внутренней и наружной температур кузова, К, оцененных по типу В;

$u_c(S_e)$, $u_c(S_i)$ – суммарные стандартные неопределенности значений площади, соответственно, внутренней и наружной поверхностей кузова испытываемого транспортного средства (без учета гофр), м²

W_k – полученное при k -м замере (всего за расчетный период в конце периода устойчивого состояния произведено n замеров) значение тепловой мощности (или холодопроизводительности), Вт;

$T_{i,k}$, $T_{e,j,k}$ – значения температур, измеренных при k -м замере, соответственно, i -м прибором внутри кузова испытываемого транспортного средства (всего в одном замере участвует одновременно l равнозначных приборов для измерения температуры) и j -м прибором снаружи кузова испытываемого транспортного средства (всего в одном замере участвует одновременно m равнозначных приборов для измерения температуры), °С;

\bar{W} , \bar{T}_i , \bar{T}_e – рассчитанные средние (за период устойчивого состояния) значения, соответственно, тепловой мощности (или холодопроизводительности), Вт, внутренней и наружной температур кузова, °С;

$\bar{T}_{i,k}$, $\bar{T}_{e,k}$ – рассчитанные средние (в пределах n -го замера) значения, соответственно, внутренней и наружной температур кузова, °С;

\bar{S}_i , \bar{S}_e – рассчитанные средние значения площади, соответственно, внутренней и наружной поверхностей кузова испытываемого транспортного средства (без учета гофр), м².

$$\bar{W} = \frac{\sum_{k=1}^n W_k}{n}$$

$$\bar{T}_i = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^l T_{i,k}}{n \cdot l}$$

$$\bar{T}_e = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m T_{e,j,k}}{n \cdot m}$$

$$\bar{T}_{i,k} = \frac{\sum_{i=1}^l T_{i,k}}{l}$$

$$\bar{T}_{e,k} = \frac{\sum_{j=1}^m T_{e,j,k}}{m}$$

Если тепловая мощность (или холодопроизводительность) теплообменников определялась на основании значений расхода электрической энергии,

потребляемой теплообменными аппаратами, математическая зависимость, на основании которой производятся необходимые расчеты, также должна быть оценена на вносимую в конечный результат неопределенность.

Оцениванию стандартных неопределенностей типа В посвящен раздел 4.3 Руководства ИСО/МЭК 98-3:2008. В настоящем комментарии приведем расчетную формулу для получения стандартной неопределенности на основании известных границ (верхнего и нижнего пределов) для оценки измеряемой физической величины. Такая ситуация часто встречается на практике и соответствует таким понятиям как класс точности прибора и его погрешность. Если интервал оценок измеряемой физической величины, x , обозначить как $2a$ (что соответствует распространенной форме записи погрешности измерительного прибора как $\pm a$), тогда:

$$u_B(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

2. При нормальных условиях испытания ~~показатель S может~~ показатели \bar{S}_i и \bar{S}_e могут быть ~~изменен~~ измерены с высокой точностью. Суммарная стандартная неопределенность для таких условий может быть принята равной $\pm 1\%$. Однако в некоторых случаях провести измерение с такой точностью невозможно.

В общем случае для расчета суммарных стандартных неопределенностей S_i и S_e , на основании которых производится определение площади теплопередающей поверхности кузова, S , может использоваться следующая методика.

Если представить S_i и S_e как функции ряда многократно измеряемых параметров, p_i и p_e , (например, длины, ширины и высоты, измеренных в различных местах кузова транспортного средства):

$$S_i = f_1(p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_y}, \dots, p_{i_Y})$$

$$S_e = f_2(p_{e_1}, p_{e_2}, \dots, p_{e_z}, \dots, p_{e_Z})$$

тогда их суммарные стандартные неопределенности можно вычислить по формулам:

$$u_c(S_i) = \sqrt{\sum_{y=1}^Y \left(u_c(p_{i_y}) \cdot \frac{\partial f_1}{\partial p_{i_y}} \right)^2}$$

$$u_c(S_e) = \sqrt{\sum_{z=1}^Z \left(u_c(p_{e_z}) \cdot \frac{\partial f_2}{\partial p_{e_z}} \right)^2}$$

где:

$\frac{\partial f_1}{\partial p_{i_y}}, \frac{\partial f_2}{\partial p_{e_z}}$ – соответствующие частные производные функций для вычисления S_i и S_e ;

$u_c(p_{i_y}), u_c(p_{e_z})$ – соответствующие суммарные стандартные неопределенности параметров p_{i_y} и p_{e_z} .

$$u_c(p_{i_y}) = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^V (p_{i_{y_v}} - \bar{p}_{i_y})^2}{V \cdot (V - 1)}} + u_B(p_{i_y})$$

$$\bar{p}_{i_y} = \frac{\sum_{v=1}^V p_{i_{y_v}}}{V}$$

где:

V – количество измерений, осуществлённых для определения среднего значения параметра p_{i_y} ;

$p_{i_{y_v}}$ – измеренное значение параметра p_{i_y} при v -м замере;

$u_B(p_{i_y})$ – стандартная неопределенность параметра p_{i_y} , оцененная по типу B (подробнее о методах и способах оценок неопределенностей по типу B см. раздел 4.3 Руководства ИСО/МЭК 98-3:2008).

Аналогично \bar{p}_{i_y} и $u_c(p_{i_y})$ определяются \bar{p}_{e_z} и $u_c(p_{e_z})$.

Погрешность при определении W не превышает $\pm 1\%$, хотя на некоторых испытательных станциях используется оборудование, дающее большую погрешность.

Температура измеряется с абсолютной точностью $\pm 0,1$ К. Поэтому при измерении разницы температур $(T_e - T_i)$ порядка 20 К погрешность удваивается с $\pm 0,5\%$ до $\pm 1\%$.

С учетом этого общая допустимая погрешность составляет $\epsilon = \pm \sqrt{0,0003} = \pm 0,017$, т.е. $\pm 1,7\%$. Максимальная допустимая погрешность $\epsilon_{\text{м}} = \pm 3\%$.

3. На точность определения коэффициента K могут оказывать влияние следующие неучтенные погрешности неопределенности:

а) "латентные" неточности, объясняющиеся допустимыми колебаниями внутренней и внешней температуры и термической инерцией стенок транспортного средства, температурой и временем;

б) погрешности неопределенности, связанные с колебаниями скорости воздушного потока в пограничном слое, и его воздействие на тепловое сопротивление.

При равных показателях скорости внутреннего и внешнего воздушного потоков возможная погрешность расширенная неопределенность будет составлять приблизительно 2,5 %, т.е. 1-2 м/с при среднем коэффициенте $K = 0,40$ Вт/м²К. При коэффициенте $K = 0,70$ Вт/м²К такая погрешность расширенная неопределенность будет равна приблизительно 5 %. При наличии существенных тепловых мостиков влияние скорости и направления воздушного потока будет значительнее.

4. И наконец, вследствие ошибки измерения площади поверхности кузова, которую на практике трудно определить в случае с нестандартным оборудованием (при этом измерении влияние оказывают факторы субъективного характера), можно определять погрешность измерения общей теплопередачи на один градус разницы температур:

$$\frac{W}{T_e - T_i} = K \cdot S$$

9. В образцах протоколов испытаний №№ 2 А и 2 В изложить строку, касающуюся погрешности определения коэффициента K , в следующей редакции:

«~~Максимальная погрешность~~ Расширенная неопределенность измерения при проведенном испытании ... % (коэффициент охвата $k = \dots$ для принятого уровня доверия ... %)»

Примеры расчетов

10. Пример расчета неопределенности измерения коэффициента K , выполненного в среде Mathcad, приведен в приложении А к настоящему официальному документу.

Обоснование

11. Использование неопределенности вместо погрешности в настоящем документе вызвано, прежде всего, следующими причинами:

широким распространением в мировой практике при описании результата измерения (погрешность чаще используется применительно к измерительным приборам);

приданию Руководству ИСО/МЭК 98-3:2008, переведенного на русский язык, статуса национального стандарта в Российской Федерации;

возможностью более широкого практического использования вследствие того, что неопределенность имеет отношение к реально полученному (измеренному) результату, выражая степень сомнения в его истинности, в то время как погрешность апеллирует к абстрактному и непознаваемому «истинному значению»;

установлением в Руководстве ИСО/МЭК 98-3:2008 понятных единых правил к оценке неопределенности, в том числе путем устранения принципиальных различий между составляющими неопределенности, обусловленными случайными эффектами, и составляющими, связанными с вносимыми поправками на систематические эффекты, а также путем учета эффектов от возможной корреляции измеряемых величин.

12. Необходимость комментария к пункту 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС вызвана тем, что Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 содержит только принципиальную классификацию и методы установления неопределенностей, вызванных различными факторами. Широкая свобода в выборе математической модели, принимаемой при проведении измерений, возможность учета бесконечного, по сути, числа составляющих неопределенности, а также учет эффектов от корреляции измеряемых величин создает значительное разнообразие конкретных методик, которые могут использоваться при установлении неопределенности измерения коэффициента K . Нисколько не посягая на эту свободу, специалисты Российской Федерации, тем не менее, хотели бы, чтобы Справочник СПС содержал определенные рекомендации по наиболее важным моментам, возникающим при нахождении неопределенности измерения коэффициента K . Обладая подобной информацией, становится возможной, в частности, обоснованная оценка требуемых классов точности измерительного оборудования при осуществлении испытаний с целью измерения значения коэффициента K .

13. В пункте 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС произведена замена термина «максимальная погрешность» на «расширенная неопределенность», как наиболее близкое в количественном выражении понятие.

Вместе с тем использование расширенной неопределенности подразумевает указание уровня доверия, для которого определяется значение коэффициента охвата. В пункте 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС указан минимальный уровень доверия, соответствующий решению большинства задач технического уровня. Коэффициент охвата, который в свою очередь может быть определен различными способами, указывается в образцах протоколов испытаний №№ 2 А и 2 В с целью возможности дальнейшего обратного вычисления суммарной стандартной неопределенности измерения коэффициента K .

В комментарии 3 к пункту 2.3.2 добавления 2 к приложению 1 к СПС произведена замена термина «погрешность» на «неопределенность» (без указания ее типа) в тех случаях, когда речь идет о понятии без конкретной формы. Во всех остальных случаях использован термин «расширенная неопределенность» по причинам, указанным выше.

14. Использование упрощенного коэффициента охвата, равного двум, для уровня доверия 95 % (и равного трем – для уровня доверия 99 %) оправданно по причине большого и трудно устанавливаемого (в том числе, вследствие корреляции) числа эффективных степеней свободы при оценивании $u_c(K)$. Значения приведенных коэффициентов охвата приблизительно соответствуют условию близости к нормальному распределению вероятностей с оценками значений коэффициента K и $u_c(K)$, что справедливо при выполнении условий центральной предельной теоремы в теории вероятностей. Учитывая значительное количество выполняемых повторных измерений физических величин, входящих в функциональную зависимость определения коэффициента K , и использование их средних значений с соответствующими оценками неопределенностей, можно считать, что вероятности с оценками значений коэффициента K и $u_c(K)$ распределены по нормальному закону.

15. Несмотря на общее сходство используемых математических методов при расчете погрешности и неопределенности, в сравнении с прошлогодним документом имеется ряд существенных отличий. В частности, введен учет корреляции между некоторыми аргументами функциональной зависимости, используемой при расчете значения коэффициента K . Как видно из примера расчета, приведенного в приложении А к настоящему официальному документу, учет корреляции между параметрами наружной и внутренней температуры кузова, а также теплопроизводительности (или холодопроизводительности) и внутренней температуры кузова внес существенную составляющую в итоговое значение суммарной стандартной неопределенности измерения коэффициента K .

Издержки

16. Дополнительные издержки отсутствуют.

Практическая осуществимость

17. Предлагаемые дополнения и изменения устраняют возможные разночтения относительно требований СПС к точности измерения коэффициента K в процессе испытаний СТС. Сделанные рекомендации

относительно методов определения различных составляющих неопределенностей, имеющих место при измерении коэффициента K , способствуют повышению степени взаимного доверия Договаривающихся сторон СПС.

Возможность обеспечения применения

18. Не предвидится никаких проблем с применением предложенных уточнений относительно использования расширенной неопределенности измерения коэффициента K у СТС.

Пример расчета неопределенности измерения коэффициента K изотермического вагона

1 Исходные данные

Потребляемая электронагревателями мощность [QD], Вт, температура внутри [TiD] и снаружи [TeD] кузова, °C:

<p>QD :=</p>	<p>TeD :=</p>
<p>(1852.7)</p> <p>1829.7</p> <p>1850.6</p> <p>1835.9</p> <p>1856.9</p> <p>1840.0</p> <p>1854.8</p> <p>1829.7</p> <p>1838.0</p> <p>1856.9</p> <p>1833.8</p> <p>1850.6</p> <p>1821.3</p> <p>1836.0</p> <p>1817.2</p> <p>1842.2</p> <p>1823.4</p> <p>1817.2</p> <p>1842.2</p> <p>1810.9</p> <p>1831.8</p> <p>1798.4</p> <p>1821.3</p> <p>1802.5</p> <p>1821.3</p> <p>1794.2</p> <p>1810.9</p> <p>1785.8</p> <p>1779.7</p> <p>1798.3</p> <p>1771.3</p> <p>1802.4</p> <p>1783.7</p> <p>1813.0</p> <p>1777.5</p> <p>1785.8</p> <p>1806.7</p> <p>1777.5</p> <p>1798.4</p> <p>1771.2</p> <p>1794.2</p> <p>1781.6</p> <p>1792.1</p> <p>1813.0</p> <p>1790.1</p> <p>1810.9</p> <p>1779.6</p> <p>1796.2</p> <p>(1763.0)</p>	<p>(7.1 7.2 7.0 6.9 7.2 7.2 6.7 6.8 7.5 7.5 6.8 7.7)</p> <p>7.1 7.2 6.9 6.8 7.2 7.2 6.8 6.8 7.5 7.5 6.9 7.7</p> <p>7.1 7.2 7.0 6.8 7.3 7.2 6.7 6.8 7.5 7.5 6.9 7.8</p> <p>7.1 7.1 7.0 6.9 7.2 7.2 6.7 6.7 7.5 7.4 6.9 7.7</p> <p>7.0 7.1 6.9 6.9 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.4 6.8 7.7</p> <p>7.1 7.1 6.9 6.9 7.2 7.1 6.7 6.8 7.4 7.5 6.8 7.8</p> <p>7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.8 7.4 7.5 6.8 7.7</p> <p>7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.4 6.9 7.7</p> <p>7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.4 6.8 7.7</p> <p>7.1 7.1 6.9 6.8 7.2 7.2 6.7 6.7 7.5 7.5 6.8 7.7</p> <p>7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.5 6.8 7.7</p> <p>7.1 7.1 6.7 6.6 7.2 7.1 6.7 6.8 7.4 7.5 6.6 7.8</p> <p>7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.4 6.7 7.7</p> <p>7.0 7.1 6.7 6.6 7.2 7.0 6.5 6.6 7.3 7.4 6.6 7.7</p> <p>7.0 7.1 6.7 6.6 7.1 7.0 6.6 6.6 7.3 7.4 6.7 7.7</p> <p>6.9 7.0 6.7 6.6 7.1 7.0 6.6 6.7 7.4 7.4 6.7 7.7</p> <p>6.9 7.0 6.5 6.6 7.1 6.9 6.6 6.6 7.3 7.3 6.6 7.6</p> <p>6.9 7.0 6.6 6.6 7.0 6.9 6.5 6.5 7.2 7.3 6.6 7.6</p> <p>6.8 6.9 6.6 6.6 6.9 6.8 6.4 6.5 7.2 7.2 6.6 7.6</p> <p>6.8 6.9 6.5 6.6 6.9 6.8 6.4 6.5 7.2 7.3 6.5 7.5</p> <p>6.7 6.9 6.5 6.5 6.9 6.8 6.5 6.5 7.1 7.2 6.6 7.5</p> <p>6.7 6.8 6.4 6.5 6.8 6.8 6.5 6.5 7.1 7.2 6.4 7.5</p> <p>6.7 6.8 6.3 6.4 6.9 6.7 6.4 6.5 7.1 7.2 6.4 7.5</p> <p>6.7 6.8 6.3 6.4 6.8 6.7 6.4 6.4 7.1 7.2 6.4 7.4</p> <p>6.7 6.8 6.4 6.5 6.8 6.7 6.4 6.4 7.1 7.2 6.5 7.4</p> <p>6.7 6.8 6.3 6.4 6.8 6.7 6.4 6.4 7.1 7.1 6.4 7.5</p> <p>6.7 6.8 6.3 6.4 6.8 6.7 6.3 6.4 7.1 7.1 6.3 7.3</p> <p>6.6 6.7 6.3 6.4 6.7 6.7 6.4 6.4 7.0 7.1 6.4 7.4</p> <p>6.7 6.8 6.2 6.3 6.8 6.7 6.3 6.3 6.9 7.0 6.3 7.4</p> <p>6.6 6.7 6.2 6.3 6.7 6.6 6.3 6.4 7.0 7.1 6.3 7.3</p> <p>6.6 6.7 6.3 6.4 6.7 6.6 6.2 6.3 7.0 7.0 6.4 7.4</p> <p>6.8 6.8 6.3 6.4 6.9 6.8 6.4 6.4 7.1 7.1 6.4 7.4</p> <p>6.7 6.8 6.3 6.4 6.7 6.7 6.4 6.4 7.0 7.1 6.4 7.3</p> <p>6.8 6.8 6.3 6.3 6.8 6.8 6.4 6.4 7.0 7.1 6.4 7.4</p> <p>6.7 6.8 6.2 6.4 6.8 6.7 6.4 6.5 7.1 7.1 6.3 7.4</p> <p>6.8 6.8 6.3 6.4 6.9 6.7 6.4 6.4 7.1 7.1 6.4 7.5</p> <p>6.8 6.8 6.4 6.5 6.9 6.8 6.4 6.5 7.2 7.2 6.5 7.5</p> <p>6.9 6.9 6.3 6.4 6.9 6.9 6.4 6.5 7.2 7.2 6.4 7.5</p> <p>6.9 6.9 6.4 6.5 7.0 6.9 6.5 6.5 7.3 7.2 6.4 7.5</p> <p>6.9 7.0 6.5 6.5 7.0 6.9 6.5 6.5 7.2 7.2 6.5 7.6</p> <p>6.9 7.0 6.4 6.5 7.1 7.0 6.5 6.6 7.2 7.3 6.5 7.6</p> <p>6.9 7.0 6.4 6.5 7.0 7.0 6.5 6.5 7.3 7.3 6.5 7.6</p> <p>7.0 7.0 6.5 6.5 7.1 7.0 6.5 6.6 7.2 7.3 6.5 7.6</p> <p>7.0 7.0 6.4 6.5 7.1 7.0 6.5 6.5 7.2 7.3 6.5 7.7</p> <p>6.9 7.0 6.4 6.4 7.0 6.9 6.5 6.5 7.2 7.2 6.5 7.6</p> <p>7.0 7.0 6.4 6.5 7.0 7.0 6.5 6.5 7.2 7.3 6.5 7.6</p> <p>(7.0 7.0 6.4 6.5 7.1 7.0 6.5 6.5 7.3 7.3 6.5 7.7)</p>

(33.8 33.7 33.6 33.2 34.0 34.1 32.8 33.0 33.2 33.2 32.4 33.6)
 33.8 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.0 33.2 33.2 32.3 33.6
 33.8 33.7 33.6 33.1 34.1 34.1 32.8 33.1 33.2 33.3 32.3 33.7
 33.8 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.2 32.4 33.7
 33.9 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6
 33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.4 33.3 32.4 33.6
 33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.2 32.9 33.1 33.4 33.3 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.6 33.2 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.3 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.9 33.2 33.4 33.4 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.9 33.1 33.3 33.3 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.9 33.1 33.4 33.3 32.4 33.8
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.9 33.1 33.4 33.3 32.4 33.8
 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.8 33.2 33.4 33.4 32.4 33.8
 33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.4 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.9 33.2 33.4 33.3 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 33.0 33.2 33.4 33.4 32.3 33.8
 33.9 33.8 33.9 33.3 34.2 34.2 32.9 33.1 33.3 33.4 32.4 33.7
 34.0 33.8 33.9 33.2 34.1 34.2 32.9 33.2 33.4 33.3 32.4 33.8
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.3 32.9 33.1 33.4 33.4 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.3 33.0 33.2 33.4 33.4 32.6 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.8 33.2 33.4 33.4 32.6 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.8 33.2 33.4 33.3 32.6 33.7
 33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.3 32.6 33.7
 33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 33.0 33.2 33.3 33.4 32.6 33.7
 TiD := 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.4 32.6 33.7
 33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.3 32.6 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.3 32.6 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.3 32.6 33.8
 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.8 33.2 33.3 33.3 32.4 33.6
 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.1 32.7 33.2 33.3 33.3 32.6 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.2 33.4 33.2 32.6 33.7
 33.8 33.8 33.9 33.2 34.1 34.1 32.9 33.2 33.3 33.2 32.6 33.7
 33.9 33.7 33.9 33.3 34.1 34.1 32.8 33.2 33.3 33.3 32.4 33.6
 33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.7
 33.9 33.7 33.8 33.3 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.2 33.3 33.3 32.3 33.7
 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.1 32.9 33.2 33.3 33.2 32.4 33.6
 33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.2 33.3 33.3 32.4 33.7
 33.9 33.8 33.9 33.2 34.1 34.1 32.9 33.2 33.2 33.2 32.6 33.6
 33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.2 33.2 32.4 33.6
 33.8 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.2 33.3 32.3 33.6
 33.8 33.7 33.6 33.2 34.1 34.2 32.8 33.1 33.2 33.2 32.4 33.7
 33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.2 32.3 33.7
 33.9 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6
 33.9 33.8 33.6 33.2 34.1 34.1 32.9 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6
 33.9 33.7 33.8 33.3 34.1 34.1 32.8 33.2 33.3 33.2 32.4 33.7
 33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6
 33.9 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6
 (33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.2 33.3 32.4 33.6)

Коэффициент охвата для уровня доверия измерения коэффициента $K_p = 95\%$:

$$\overline{k} := 2$$

Класс точности прибора для измерения потребляемой электрической мощности, % к результату измерения: $\overline{\delta_Q} := 1$

Инструментальная погрешность измерения температуры внутри кузова вагона, К: $\overline{\Delta_{Ti}} := 0.1$

Инструментальная погрешность измерения температуры снаружи кузова вагона, К: $\overline{\Delta_{Te}} := 0.1$

Наружные размеры кузова вагона:

Примечание – Наружные размеры кузова вагона приняты по технической документации. Допустимая ошибка может быть принята равной половине единицы последнего разряда числа, которым задано значение этого параметра

длина, среднее значение длины и принятое значение ошибки, м:

$$\overline{LeD} := 15.750 \quad mLe := \text{mean}(LeD) = 15.750 \quad \overline{\Delta_{Le}} := \frac{10^{-3}}{2} = 0.0005$$

ширина, среднее значение ширины и принятое значение ошибки, м:

$$\overline{BeD} := 2.790 \quad mBe := \text{mean}(BeD) = 2.790 \quad \overline{\Delta_{Be}} := \frac{10^{-3}}{2} = 0.0005$$

высота по боковой стенке, ее среднее значение и принятое значение ошибки, м:

$$\overline{HeD} := 2.915 \quad mHe := \text{mean}(HeD) = 2.915 \quad \overline{\Delta_{He}} := \frac{10^{-3}}{2} = 0.0005$$

высота по центральной продольной оси, ее среднее значение и принятое значение ошибки, м:

$$\overline{HHeD} := 3.323 \quad mHHe := \text{mean}(HHeD) = 3.323 \quad \overline{\Delta_{HHe}} := \frac{10^{-3}}{2} = 0.0005$$

Внутренние размеры кузова вагона (грузового помещения):

Примечание – Внутренние размеры кузова вагона приняты по результатам обмера (прямые многократные равноточные измерения) измерительной рулеткой длиной 15 м. в различных местах кузова. Инструментальная погрешность измерительной рулетки составляет 0.005 м (половина цены деления). При определении длины кузова вагона, превышающей длину рулетки, измерения производились путем двух последовательных замеров с последующим сложением полученных результатов; полученная погрешность при этом принята так же удвоенной.

инструментальная погрешность измерительной рулетки, м:

$$\overline{\Delta_{\text{tape}}} := \frac{10^{-2}}{2} = 0.005$$

длина, среднее значение длины и погрешность измерения, м:

$$\overline{LiD} := (15.395 \ 15.405 \ 15.400 \ 15.400) \quad mLi := \text{mean}(LiD) = 15.400 \quad \overline{\Delta_{Li}} := 2 \cdot \overline{\Delta_{\text{tape}}} = 0.010$$

ширина, среднее значение ширины и погрешность измерения, м:

$$\overline{BiD} := (2.455 \ 2.450 \ 2.455 \ 2.455) \quad mBi := \text{mean}(BiD) = 2.454 \quad \overline{\Delta_{Bi}} := \overline{\Delta_{\text{tape}}} = 0.005$$

высота по боковой стенке, ее среднее значение и погрешность измерения, м:

$$\overline{HiD} := (2.640 \ 2.630 \ 2.640 \ 2.630) \quad mHi := \text{mean}(HiD) = 2.635 \quad \overline{\Delta Hi} := \Delta_{\text{tape}} = 0.005$$

высота по центральной продольной оси, ее среднее значение и погрешность измерения, м:

$$\overline{HHiD} := (2.905 \ 2.900) \quad mHHi := \text{mean}(HHiD) = 2.902 \quad \overline{\Delta HHi} := \Delta_{\text{tape}} = 0.005$$

Расчет тепловой мощности:

длина силового кабеля от прибора учета до места ввода внутрь транспортного

средства, м:
$$L_{\text{line}} := 60 - \frac{mLi}{2}$$

удельное сопротивление проводника в силовом кабеле, Ом-мм²/м: $\overline{\rho} := 0.0175$

расчетное напряжение в сети, В: $\overline{U} := 220$

площадь поперечного сечения проводника в силовом кабеле, мм²: $\overline{S} := 2.5$

расчет значений тепловой мощности, Вт:

$$WD := \left[\overline{QD} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \overline{QD} \cdot L_{\text{line}} \cdot \overline{\rho}}{U^2 \cdot S} \right) \right] =$$

1800.8
1779.1
1798.8
1784.9
1804.7
1788.8
1802.8
1779.1
1786.9
1804.7
1782.9
1798.8
...

2 Определение среднего значения площади теплопередающей поверхности кузова вагона и ее суммарной стандартной неопределенности

Стандартная неопределенность измерения внутренней длины кузова вагона, м, оцененная по типу A:

$$uA_{Li} := \sqrt{\frac{\sum (LiD^T - mLi)^2}{\text{cols}(LiD) - (\text{cols}(LiD) - 1)}} = 0.0020$$

Стандартная неопределенность измерения внутренней длины кузова вагона, м, оцененная по типу B:

$$uB_{Li} := \frac{\Delta_{Li}}{\sqrt{3}} = 0.0058$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения внутренней длины кузова вагона, Вт:

$$uC_{Li} := \sqrt{uA_{Li}^2 + uB_{Li}^2} = 0.0061$$

То же, ширины, высоты по боковой стенке и высоты по центральной продольной оси кузова вагона, м:

$$\begin{aligned}
uA_Bi &:= \sqrt{\frac{\sum (BiD^T - mBi)^2}{\text{cols}(BiD) \cdot (\text{cols}(BiD) - 1)}} = 0.0012 & uB_Bi &:= \frac{\Delta_Bi}{\sqrt{3}} = 0.0029 & uC_Bi &:= \sqrt{uA_Bi^2 + uB_Bi^2} = 0.0031 \\
uA_Hi &:= \sqrt{\frac{\sum (HiD^T - mHi)^2}{\text{cols}(HiD) \cdot (\text{cols}(HiD) - 1)}} = 0.0029 & uB_Hi &:= \frac{\Delta_Hi}{\sqrt{3}} = 0.0029 & uC_Hi &:= \sqrt{uA_Hi^2 + uB_Hi^2} = 0.0041 \\
uA_HHi &:= \sqrt{\frac{\sum (HHiD^T - mHHi)^2}{\text{cols}(HHiD) \cdot (\text{cols}(HHiD) - 1)}} = 0.0025 & uB_HHi &:= \frac{\Delta_HHi}{\sqrt{3}} = 0.0029 & uC_HHi &:= \sqrt{uA_HHi^2 + uB_HHi^2} = 0.0038
\end{aligned}$$

Стандартная неопределенность наружной длины, ширины, высоты по боковой стенке и высоты по центральной продольной оси кузова вагона, оцененная по типу В:

$$uB_Le := \frac{\Delta_Le}{\sqrt{3}} = 0.0003 \quad uB_Be := \frac{\Delta_Be}{\sqrt{3}} = 0.0003 \quad uB_He := \frac{\Delta_He}{\sqrt{3}} = 0.0003 \quad uB_HHe := \frac{\Delta_HHe}{\sqrt{3}} = 0.0003$$

Суммарная стандартная неопределенность наружной длины, ширины, высоты по боковой стенке и высоты по центральной продольной оси кузова вагона:

$$u\tilde{N}_Le := uB_Le = 0.0003 \quad uC_Be := uB_Be = 0.0003 \quad uC_He := uB_He = 0.0003 \quad uC_HHe := uB_HHe = 0.0003$$

Расчет удвоенной средней длины скругления крыши вагона и ее суммарной стандартной неопределенности:

Примечание – Ниже приведена приближенная формула для вычисления удвоенной длины скругления крыши вагона из предположения его полуэллиптической формы. Максимальная погрешность этой формулы ~0.3619 % при эксцентриситете эллипса ~0.979811 (соотношение осей ~1/5). Данная методическая погрешность всегда положительная

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

Эмпирический параметр:

Функция для вычисления удвоенной длины скругления крыши вагона:

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

Средние значения удвоенной длины скругления крыши вагона снаружи, P_e , и внутри, P_i , м:

$$mPe := fP(mBe, mHe, mHHe) = 6.117$$

$$mPi := fP(mBi, mHi, mHHi) = 5.211$$

Суммарная стандартная неопределенность удвоенной длины скругления крыши вагона снаружи, uC_Pe , и внутри, uC_Pi , м:

$$\begin{aligned}
uC_Pe &:= \sqrt{\left(uC_Be \frac{d}{dmBe} fP(mBe, mHe, mHHe) \right)^2 + \left(uC_He \frac{d}{dmHe} fP(mBe, mHe, mHHe) \right)^2 + \dots} \\
&+ \left(uC_HHe \frac{d}{dmHHe} fP(mBe, mHe, mHHe) \right)^2 + \frac{\left(\frac{0.3619}{100} \cdot mPe \right)^2}{3} = 0.0128
\end{aligned}$$

$$u_{C_Pi} := \sqrt{\left(u_{C_Bi} \frac{d}{dmBi} f(mBi, mHi, mHHi)\right)^2 + \left(u_{C_Hi} \frac{d}{dmHi} f(mBi, mHi, mHHi)\right)^2 + \left(u_{C_HHi} \frac{d}{dmHHi} f(mBi, mHi, mHHi)\right)^2 + \frac{\left(\frac{0.3619}{100} \cdot mPi\right)^2}{3}} \dots = 0.0157$$

Определение средней площади теплопередающей поверхности кузова вагона:

Функция для вычисления площади кузова вагона:

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

Функция для вычисления средней площади теплопередающей поверхности кузова вагона:

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

Значение средней площади кузова вагона, м²:

$$mS := f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) = 186.953$$

Суммарная стандартная неопределенность средней площади теплопередающей поверхности кузова вагона, м²:

$$u_{C_S} := \sqrt{\left(u_{\tilde{N}_{Le}} \frac{d}{dmLe} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_Be} \frac{d}{dmBe} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_He} \frac{d}{dmHe} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_HHe} \frac{d}{dmHHe} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_Li} \frac{d}{dmLi} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_Bi} \frac{d}{dmBi} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_Hi} \frac{d}{dmHi} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_HHi} \frac{d}{dmHHi} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_Pe} \frac{d}{dmPe} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 + \left(u_{C_Pi} \frac{d}{dmPi} f(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2} \dots = 0.118$$

3 Расчет среднего значения тепловой мощности и ее суммарной стандартной неопределенности

Среднее значение тепловой мощности, Вт: $\overline{mW} := \text{mean}(WD) = 1762$

Стандартная неопределенность измерения тепловой мощности, Вт, оцененная по типу А:

$$uA_W := \sqrt{\frac{\sum (WD - mW)^2}{\text{rows}(WD) \cdot (\text{rows}(WD) - 1)}} = 3.5$$

Стандартная неопределенность измерения тепловой мощности, Вт, оцененная по типу В:

$$uB_W := \frac{\frac{\delta_Q}{100} \cdot \text{mean}(WD)}{\sqrt{3}} = 10.2$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения тепловой мощности, Вт:

$$uC_W := \sqrt{uA_W^2 + uB_W^2} = 10.8$$

Примечание – Неопределенностью потерь электрической мощности в проводах пренебрегаем ввиду ее слишком малого влияния на конечный результат в сравнении с остальными рассматриваемыми неопределенностями, имеющими место при измерении значения коэффициента K

4 Расчет среднего значения температуры внутри кузова вагона и ее суммарной стандартной неопределенности

Средние значения температуры внутри кузова вагона, °C:

$$mTiD := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(TiD) - 1 \\ mTiD_i \leftarrow \text{mean} \left[(TiD^T)^{(i)} \right] \\ \text{return } mTiD \end{cases} \quad mTiD = \begin{array}{|c|} \hline 33.4 \\ \hline \dots \\ \hline \end{array}$$

Среднее значение температуры внутри кузова вагона, °C, в границах расчетного интервала:

$$mTi := \text{mean}(mTiD) = 33.5$$

Стандартная неопределенность измерения температуры внутри кузова вагона при одном замере, К, оцененная по типу А:

$$uA1_Ti := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(TiD) - 1 \\ uA1_Ti_i \leftarrow \sqrt{\frac{\sum \left[(TiD^T)^{(i)} - mTiD_i \right]^2}{\text{cols}(TiD) \cdot (\text{cols}(TiD) - 1)}} \\ \text{return } \max(uA1_Ti) \end{cases} \quad uA1_Ti = 0.16$$

Стандартная неопределенность измерения средней температуры внутри кузова вагона (в серии замеров), К, оцененная по типу А:

$$uA2_Ti := \sqrt{\frac{\sum (mTiD - mTi)^2}{\text{rows}(TiD) \cdot (\text{rows}(TiD) - 1)}} = 0.01$$

Стандартная неопределенность измерения температуры внутри кузова вагона, К, оцененная по типу В:

$$u_{B_Ti} := \frac{\Delta_Ti}{\sqrt{3}} = 0.06$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения температуры внутри кузова вагона, К:

$$u_{C_Ti} := \sqrt{u_{A1_Ti}^2 + u_{A2_Ti}^2 + u_{B_Ti}^2} = 0.29$$

5 Расчет среднего значения температуры снаружи кузова вагона и ее суммарной стандартной неопределенности

Средние значения температуры снаружи кузова вагона, °С:

$$m_{TeD} := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(TeD) - 1 \\ m_{TeD}_i \leftarrow \text{mean} \left[\left(TeD^T \right)^{\langle i \rangle} \right] \\ \text{return } m_{TeD} \end{cases} \quad m_{TeD} = \begin{array}{|c|} \hline 7.1 \\ \hline 7.1 \\ \hline 7.2 \\ \hline 7.1 \\ \hline 7.1 \\ \hline 7.1 \\ \hline \dots \\ \hline \end{array}$$

Среднее значение температуры снаружи кузова вагона, °С, в границах расчетного интервала:

$$m_{Te} := \text{mean}(m_{TeD}) = 6.9$$

Стандартная неопределенность измерения температуры снаружи кузова вагона при одном замере, К, оцененная по типу А:

$$u_{A1_Te} := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(TeD) - 1 \\ u_{A1_Te}_i \leftarrow \sqrt{\frac{\sum \left[\left(TeD^T \right)^{\langle i \rangle} - m_{TeD}_i \right]^2}{\text{cols}(TeD) \cdot (\text{cols}(TeD) - 1)}} \\ \text{return } \max(u_{A1_Te}) \end{cases} \quad u_{A1_Te} = 0.12$$

Стандартная неопределенность измерения средней температуры снаружи кузова вагона (в серии замеров), К, оцененная по типу А:

$$u_{A2_Te} := \sqrt{\frac{\sum (m_{TeD} - m_{Te})^2}{\text{rows}(TeD) \cdot (\text{rows}(TeD) - 1)}} = 0.02$$

Стандартная неопределенность измерения температуры снаружи кузова вагона, К, оцененная по типу В:

$$u_{B_Te} := \frac{\Delta_Te}{\sqrt{3}} = 0.06$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения температуры снаружи кузова вагона, К:

$$u_{C_Te} := \sqrt{u_{A1_Te}^2 + u_{A2_Te}^2 + u_{B_Te}^2} = 0.27$$

6 Оценка корреляций

Анализ схемы проведения испытаний на измерение коэффициента К позволяет сделать вывод о коррелированности (во времени) следующих рядов измерений:

- а) средних значений температуры снаружи и внутри кузова вагона

- б) значений тепловой мощности и средних значений температуры внутри кузова вагона

Расчетное значение коэффициента корреляции средних значений температуры снаружи и внутри кузова вагона:

$$r_{Te_Ti} := \begin{cases} r_{Te_Ti_0} \leftarrow \text{corr}(mTeD, mTiD) \\ \text{for } i \in 1.. \text{rows}(mTiD) - 1 \\ r_{Te_Ti_i} \leftarrow \text{corr}(mTeD, \text{stack}(\text{submatrix}(mTiD, i, \text{rows}(mTiD) - 1, 0, 0), \text{submatrix}(mTiD, 0, i - 1, 0, 0))) \\ \text{return } \max(r_{Te_Ti}) \end{cases}$$

$$r_{Te_Ti} = 0.860$$

Расчетное значение коэффициента корреляции значений тепловой мощности и средних значений температуры внутри кузова вагона:

$$r_{W_Ti} := \begin{cases} r_{W_Ti_0} \leftarrow \text{corr}(WD, mTiD) \\ \text{for } i \in 1.. \text{rows}(mTiD) - 1 \\ r_{W_Ti_i} \leftarrow \text{corr}(WD, \text{stack}(\text{submatrix}(mTiD, i, \text{rows}(mTiD) - 1, 0, 0), \text{submatrix}(mTiD, 0, i - 1, 0, 0))) \\ \text{return } \max(r_{W_Ti}) \end{cases}$$

$$r_{W_Ti} = 0.726$$

7 Расчет среднего значения коэффициента K и его суммарной стандартной неопределенности

Функция для вычисления значения коэффициента K:

$$fK(W, Ti, Te, S) := \frac{W}{S(Ti - Te)}$$

Среднее значение коэффициента K, Вт/(м²K):

$$mK := fK(mW, mTi, mTe, mS) = 0.35$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения коэффициента K, Вт/(м²K):

$$u_{C_K} := \sqrt{\left(u_{C_W} \frac{d}{dmW} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right)^2 + \left(u_{C_Ti} \frac{d}{dmTi} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right)^2 + \left(u_{C_Te} \frac{d}{dmTe} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right)^2 + \left(u_{C_S} \frac{d}{dmS} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right)^2 + 2 \cdot \left(\left| \frac{d}{dmTe} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right| \cdot \left| \frac{d}{dmTi} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right| \cdot u_{C_Te} \cdot u_{C_Ti} \cdot r_{Te_Ti} \dots \right. \\ \left. + \left| \frac{d}{dmW} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right| \cdot \left| \frac{d}{dmTi} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right| \cdot u_{C_W} \cdot u_{C_Ti} \cdot r_{W_Ti} \right)} = 0.008$$

8 Расчет расширенной неопределенности измерения коэффициента K

$$U_K := u_{C_K} \cdot k = 0.017 \quad \text{или в процентах:} \quad \frac{U_K}{mK} \cdot 100 = 4.7$$