

Теплотехнические свойства вагонов и контейнеров из экструдированных алюминиевых панелей



А. Н. Балалаев,
докт. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Вагоны» Самарского
государственного
университета путей
связи (СамГУПС)



А. С. Мокшанов,
аспирант СамГУПС



М. А. Паренюк,
канд. техн. наук,
доцент кафедры «Вагоны»
СамГУПС

При колебаниях температуры наружного воздуха от -40 до $+40$ °С система охлаждения, отопления и вентиляции пассажирского вагона должна поддерживать среднюю температуру в пределах от $+20$ до $+26$ °С. Чем ниже коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций кузова вагона, тем меньше требуется затрат энергии для обеспечения необходимого температурного режима. Одним из самых высоких показателей теплоизоляции обладают стенки вагонов, выполненные из алюминиевых пустотелых панелей, полученных методом экструзии, герметизированных по краям и вакуумированных до величины остаточного давления менее $1...2$ кПа.

При эксплуатации пассажирских вагонов необходимо обеспечивать для пассажиров определенные требования по жизнеобеспечению, которые регламентированы ГОСТ Р 51690-2000 [1]. Согласно [1], коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций кузова вагона должен быть не более $1,0$ Вт/($m^2 \cdot K$), необходимо, чтобы система отопления и вентиляции обеспечивала среднюю температуру воздуха пассажирских помещений вагона (22 ± 2) °С при температуре наружного воздуха до -40 °С, система охлаждения при температуре наружного воздуха до $+40$ °С должна автоматически обеспечивать температуру воздуха в пассажирском помещении вагона $22...26$ °С, количество подаваемого в вагон с системой кондиционирования наружного воздуха на одного человека должно быть: не менее 10 м³/ч – при температуре ниже -20 °С, 15 м³/ч – при температуре от -20 °С до -5 °С включительно, 20 м³/ч – при температуре от -5 °С до $+26$ °С включительно; для вагона без кондиционирования воздуха: 10 м³/ч – в зимнее время года, 20 м³/ч – в летнее время года.

Таким образом, для обеспечения комфортных условий для пассажиров в пассажирских вагонах необходимо затрачивать энергию на обеспечение необходимого температурного режима внутри вагона, а величина этих затрат зависит от коэффициента тепло-

передачи ограждающих конструкций кузова.

Аналогичные проблемы возникают при транспортировке скоропортящихся грузов в рефрижераторных вагонах и изотермических контейнерах, для которых коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций кузова вагона и стенок контейнера должен быть не более $0,36$ Вт/($m^2 \cdot K$) [2].

В настоящее время актуальной задачей является снижение энергетических затрат при эксплуатации пассажирских и рефрижераторных вагонов, а также изотермических контейнеров. Одним из путей решения этой задачи является создание ограждающих конструкций кузова вагонов и стенок контейнеров, способных существенно понизить их коэффициент теплопередачи.

Целью настоящей статьи является определение теплотехнических свойств кузовов пассажирских и рефрижераторных вагонов, а также стенок изотермических контейнеров из алюминиевых панелей, полученных методом экструзии.

В качестве защиты от температурного воздействия окружающей среды на пассажиров предложено изготавливать стенки вагонов и контейнеров из алюминиевых пустотелых панелей, полученных методом экструзии, загерметизированных по краям и отвакуумированных до величины остаточного давления менее $1...2$ кПа. Такая кон-

струкция стенок вагонов и контейнеров представляет собой один из лучших видов теплоизоляции, так называемую экранно-вакуумную теплоизоляцию [3].

Согласно [2], для определения приведенного коэффициента теплопередачи (термин «приведенный» относится к вагону в целом) ограждения кузова вагона сначала вычисляются коэффициенты теплопередачи отдельных элементов ограждения (крыши, пола, окон, стен) по формуле

$$K_{i \text{ факт}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_{ij}}{\lambda_{ij}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ограждения кузова вагона, Вт/(м²·К); δ_{ij} – толщина j -го слоя i -го элемента кузова, м; λ_{ij} – коэффициент теплопроводности материала соответствующего слоя ограждения, Вт/(м·К); $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности ограждения i -го элемента кузова, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности кузова, зависящий от средней скорости движения поезда, вычисляются по формуле

$$\alpha_{\text{н}} = a + \frac{0,7 \cdot (v+15)}{L_1^{0,2}}, \quad (2)$$

где a – коэффициент, учитывающий лучистый теплообмен (для летних условий $a = 9$ Вт/(м²·К)); v – скорость движения вагона, км/ч; L_1 – длина огражденной части кузова вагона, м.

Для всех типов пассажирских вагонов коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности ограждения равен

$$\alpha_{\text{в}} = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Для рефрижераторных вагонов внутри грузового помещения принимаются следующие значения коэффициента теплоотдачи:

- вблизи пола $\alpha_{\text{в}} = 6$ Вт/(м²·К);
- вблизи стен $\alpha_{\text{в}} = 10$ Вт/(м²·К);
- вблизи крыш $\alpha_{\text{в}} = 9$ Вт/(м²·К).

Кузов вагона внутри имеет продольные и поперечные элементы жесткости, выполненные из стали. В местах их размещения создаются тепловые мосты, увеличивающие коэффициенты теплопередачи элементов ограждения. Во время эксплуатации вагона возможно появление зазоров между слоями ограждения кузова. Эти факторы следует учесть путем увеличения значений коэффициентов $K_{i \text{ факт}}$, полученных по формуле (1),

для пассажирских вагонов на 60 %, а для рефрижераторных вагонов на 50 %. Так вычисляются значения $K_{i \text{ расч}}$.

$$K_{i \text{ расч}} = 1,6 \cdot K_{i \text{ факт}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} - \text{ для пассажирских вагонов};$$

$$K_{i \text{ расч}} = 1,5 \cdot K_{i \text{ факт}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} - \text{ для изотермических вагонов}.$$

Приведенный коэффициент теплопередачи ограждения кузова вагона находится с учетом площадей ограждения и значений $K_{i \text{ расч}}$

$$K_{\text{пр}} = \frac{\sum_{i=1}^m (K_{i \text{ расч}} \cdot F_i)}{\sum_{i=1}^m F_i}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (3)$$

Так как относительные величины площадей отдельных элементов ограждения пассажирского вагона известны, то из уравнения (1) можно найти величину термического сопротивления теплоизоляционного слоя, заключенного между наружным и внутренним слоями ограждения:

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{K_{\text{пр}}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{\delta_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}}} + \frac{\delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} \right). \quad (4)$$

Так как у современных пассажирских вагонов, согласно проведенным по формулам (1)–(3) расчетам, величина приведенного коэффициента теплопередачи ограждения кузова лежит в диапазоне $K_{\text{пр}} = 0,58...1$, то величина термического сопротивления, вычисленная по формуле (4), составляет $R_{\text{из}} = 1,61...0,88$. Аналогичные расчеты для рефрижераторного подвижного состава и изотермических контейнеров дают значения $K_{\text{пр}} = 0,24...0,36$; $R_{\text{из}} = 4,13...2,65$.

Для расчета процесса теплопередачи через панели, полученные из алюминиевого сплава методом экструзии, с учетом теплопроводности ребер, конвективного теплообмена при низком давлении среды в полостях алюминиевых панелей и радиационного теплообмена предлагается

конструктивная схема таких панелей, охраняемая патентом [4] и показанная на рис. 1.

Основу математической модели для расчета термического сопротивления панели, показанной на рис. 1, составляют уравнения для плотности тепловых потоков за счет радиации, конвекции и теплопроводности [3]:

- уравнение для плотности теплового потока между плоскопараллельными поверхностями за счет радиации

$$q_{\text{рад}} = \frac{1}{n+1} C_0 \epsilon_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где n – число установленных между поверхностями экранов,

$C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела,

$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$ – приведенная степень черноты

двух плоскопараллельных поверхностей, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,055$ – степень черноты поверхностей из алюминиевого сплава (см. [3]);

- уравнение для плотности теплового потока между внутренними поверхностями панели за счет конвективного теплообмена

$$q_{\text{кон}} = \alpha_{\text{кон}} (T_1 - T_2), \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{кон}}$ – коэффициент теплоотдачи воздуха во внутренней полости панели, Вт/(м²·К);

- уравнение для плотности теплового потока по ребрам за счет теплопроводности

$$q_{\text{реб}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta_{\text{реб}} - \delta_{\text{пол}}}{\lambda_{\text{реб}}} + \frac{\delta_{\text{пол}}}{\lambda_{\text{пол}}}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{реб}} = 160$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{пол}} = 0,082$ Вт/(м·К) – соответственно коэффициенты теплопроводности дюралюминиевого сплава и полимерного материала (полистирола) (см. [3]).

Суммарная плотность теплового потока находится с учетом соотношения длины полости $L_{\text{п}}$ и толщины ребра

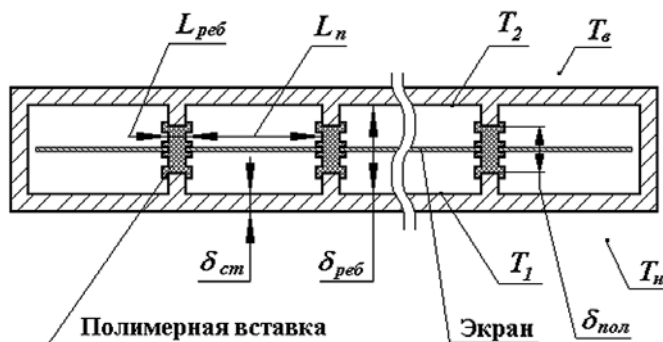


Рис. 1. Схема панели, полученной из алюминиевого сплава методом экструзии, с полимерными вставками и экранами из листового алюминия

$L_{реб}$ (толщина алюминиевого ребра и толщина полимерной вставки принята одинаковой)

$$q_{\Sigma} = q_{рад}(1-d) + q_{кон}(1-d) + q_{мен}d, \quad (8)$$

где $d = L_{реб}/(L_{н} + L_{реб})$ – доля поверхности теплообмена за счет теплопроводности.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{кон}$, присутствующий в уравнении (6), находится для свободной конвекции согласно [3]

$$\alpha_{кон} = 0,184 \lambda_{воз} \left[\frac{\rho_{воз}^2 g \beta_1 C_p |T_1 - T_2|}{\lambda_{воз} \mu_{воз}} \right]^{0,33}, \quad (9)$$

где $\lambda_{воз} = 0,0232$ Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности воздуха;

$\rho_{воз}$ – плотность воздуха (величина, прямо пропорциональная его давлению), кг/м³;

$g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения;

$\beta_1 = 0,00358$ – коэффициент температурного расширения воздуха;

$c_p = 1005$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха;

$\mu_{воз} = 0,19 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м² – коэффициент динамической вязкости воздуха (см. [3]).

Величина термического сопротивления панели из экструдированного алюминия

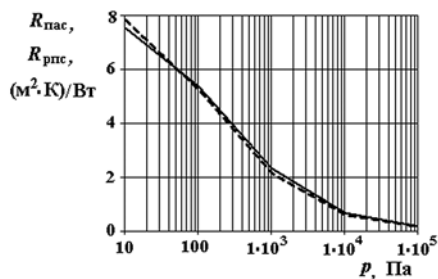


Рис. 2. Зависимость термического сопротивления панели из экструдированного алюминия от величины давления воздуха в герметичных полостях панели

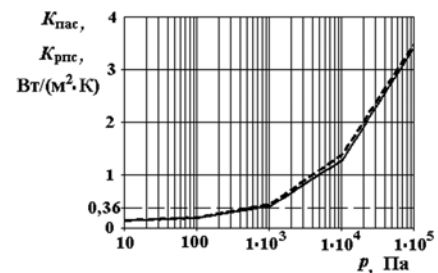


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи через ограждение кузова вагона (контейнера) из панелей, полученных методом экструзии, от величины давления воздуха в герметичных полостях панелей

миния находится из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} R_{пан} = \frac{T_n - T_a}{q_{\Sigma}} - \left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{2\delta_{cm}}{\lambda_{ал}} + \frac{1}{\alpha_a} \right), \\ T_1 = T_n - q_{\Sigma} \left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{ал}} \right), \\ T_2 = T_n + q_{\Sigma} \left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{ал}} \right). \end{cases} \quad (10)$$

Результаты расчетов термического сопротивления панели из экструдированного алюминия при $d=0,028$, $\delta_{cm} = 0,004$ м, $\delta_{реб} = 0,08$ м, $\delta_{ноот} = 0,06$ м, $T_n = 40$ °С представлены на рис. 2. Для пассажирского вагона (сплошная линия) температура внутри вагона принималась равной $T_a = 22$ °С, для рефрижераторного вагона и изотермического контейнера температура внутри вагона (контейнера) принималась равной $T_a = -20$ °С.

Результаты расчетов коэффициента теплопередачи через ограждение кузова вагона (сплошная линия – пассажирский вагон, пунктирная линия – рефрижераторный вагон и изотермический контейнер) показаны на рис. 3.

Анализ результатов расчетов показал, что при остаточном давлении в полостях экструдированных алюминиевых панелей свыше 3...5 кПа стенки из таких панелей по своим теплозащитным свойствам проигрывают современным теплоизоляционным материалам типа пенополистирола ПСБ-С или материала URSA. При понижении величины остаточного давления менее 1...2 кПа в полостях алюминиевых панелей теплозащитные свойства таких панелей значительно превышают свойства современных теплоизоляционных материалов. Дальнейшее снижение давления в панелях не приводит к увеличению теплозащитных свойств из-за действия радиационного теплообмена и теплопередачи по ребрам жесткости путем теплопроводности.

Таким образом, с помощью разработанной математической модели установлены следующие конструктивные факторы, влияющие на теплоизоляционные свойства экструдированных алюминиевых панелей:

- величина остаточного вакуума в полостях панелей;
- расстояние между внешней и внутренней стенками панелей;
- соотношение между толщиной ребер и расстоянием между ними;

- наличие экранов из алюминиевой фольги в полостях панелей;
- наличие теплоизолирующих вставок в ребрах панелей.

Согласно расчетам, использование оптимальных конструктивных факторов способно в 2...3 раза повысить теплоизоляционные свойства экструдированных алюминиевых панелей по сравнению с современными теплоизоляционными материалами. Выполнение стенок пассажирских и рефрижераторных вагонов, а также изотермических контейнеров из таких панелей позволит значительно сократить затраты энергии на охлаждение внутренних помещений в летний период и их обогрев – зимой.

Для изотермических контейнеров повышение теплоизоляционных свойств стенок за счет применения экструдированных алюминиевых панелей позволяет использовать в качестве нагревательно-охлаждающего устройства термоэлектрический преобразователь, хотя он и имеет меньший КПД, чем парокompрессионная холодильная машина, зато обладает более надежной конструкцией, меньшим весом и габаритами и позволяет легко менять режимы охлаждения и обогрева.

Изменение давления в полостях экструдированных алюминиевых панелей при их разгерметизации может служить управляющим воздействием для сигнализатора потери теплоизоляционных свойств стенок, используемого, например, в качестве антивандальных мероприятий. ■

Литература

1. ГОСТ Р 51690-2000 «Вагоны пассажирские магистральных железных дорог колеи 1520 мм».
2. Энергетика и технология хладотранспорта / Под ред. Л. Я. Левенталя. М.: Транспорт, 1993. 289 с.
3. Техническая термодинамика и теплопередача: Курс лекций / В.Д. Карминский. М.: Маршрут, 2005. 224 с.
4. Патент на полезную модель №129188, РФ, F16L59/06, B82Y99/00. Теплоизоляционное изделие / А. Н. Балалаев, А. С. Мокшанов. Заявка № 2012155384/06; Заявлено 19.12.2012; Опубл. 20.06.2013; Приоритет 19.12.2012 // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 17.