УДК 629.4.01 DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-88-92

О влиянии внешних факторов на коэффициент теплопередачи кузова специализированного транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов

Т. И. НАБАТЧИКОВА[1], С. Н. НАУМЕНКО[2], Г. Б. ГУСЕВ[1]

[1] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

[2] Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Осуществлена оценка влияния внешних факторов на коэффициент теплопередачи кузова изотермического транспортного средства. Учтено изменение коэффициента теплоотдачи в связи с влиянием скорости движения изотермического транспортного средства и инсоляции. Для оценки изменения коэффициента теплопередачи из критериальных зависимостей определены коэффициенты теплоотдачи от внутренних и наружных ограждающих конструкций к окружающему воздуху для стоящего вагона и при его движении. В результате произведенных расчетов получено расхождение величины предельного срока перевозки скоропортящихся грузов по сравнению с действующей методикой на 3–10 %.

Ключевые слова: изотермическое транспортное средство; специализированное транспортное средство; коэффициент теплопередачи; теплоизоляция; теплоограждающие конструкции транспортных средств; кузов вагона; перевозки грузов; коэффициент теплоотдачи; инсоляция; движение воздушных масс

Введение. Удовлетворение потребности населения в доставке скоропортящихся грузов (СПГ) надлежащего качества во многом зависит от стабильной работы специализированных транспортных средств и точности расчета предельного срока перевозки этих грузов потребителю. Основной величиной, используемой для расчета предельного срока перевозки СПГ по железной дороге, является коэффициент теплопередачи кузова изотермического вагона или контейнера — K, Вт/(м^2·К). В соответствии с действующим Соглашением [1] установлены предельные показатели коэффициента K для специализированных транспортных средств. К сожалению, ни одна из известных методик расчета предельного срока перевозки СПГ в полной мере не учитывает влияние внешних факторов (наличие ветра, скорости движения поезда, наличие осадков, влажность окружающего воздуха и т. п.). Между тем точность оценки данной величины особенно важна при использовании в качестве специализированных транспортных средств изотермических вагонов или контейнеров (ИВК), не оснащенных установками охлаждения или обогрева. В данной работе предпринята попытка оценить влияние некоторых из внешних факторов на величину коэффициента теплопередачи кузова ИВК.

E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (С. Н. Науменко)

Оценка влияния скорости движения состава на коэффициент теплопередачи изотермического транспортного средства. Расчет предельного срока перевозки СПГ в вагоне-термосе в соответствии с действующей Типовой методикой по установлению температурных режимов и предельных сроков перевозки ОАО «РЖД» новых видов скоропортящихся грузов в изотермических транспортных средствах (далее — Методика) [2, п. 8] производится по уравнению

$$\tau_{\text{пред}} = \frac{\ln \Theta_{\text{уо}} - \ln \Theta_{\text{пред}}}{b_{\text{и}}},$$

где $\Theta_{\text{уо}}$ — начальный обобщенный параметр температуры воздуха в груженом вагоне-термосе сразу после закрытия погрузочной двери; $\Theta_{\text{пред}}$ — предельный обобщенный параметр температуры воздуха; $b_{\text{и}}$ — коэффициент тепловой инерции системы «вагон-термос — воздух — груз», ч$^{-1}$, который определяется по формуле

$$b_{\text{и}} = \frac{\beta K F}{W_{\text{гр}}},$$

где β — коэффициент, учитывающий воздухообмен через неплотности ограждающих кузов конструкций, Вт/(м^2·К); F — расчетная теплопередающая поверхность кузова вагона-термоса, м^2; $W_{\text{гр}}$ — теплоусвоение штабеля скоропортящегося груза, кДж/град.

Из приведенных выше зависимостей видно, что предельный срок перевозки СПГ обратно пропорционален коэффициенту теплопередачи K.

Известно [3, 4], что коэффициент теплопередачи может быть определен как

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности ограждающей конструкции вагона, Вт/(м²·К); δ_i — толщина ограждающей конструкции, м; λ_i — коэффициент теплопроводности ограждающей конструкции, Вт/(м·К); α_2 — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждающей конструкции в окружающую среду, Вт/(м²·К).

Величина α_1 для условий стоящего и движущегося поезда при различных температурных условиях снаружи ИВК может быть принята как постоянная (инфильтрацией воздуха внутри корпуса контейнера или вагона можно пренебречь).

Отношение $\left(\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}\right)$ для ИВК с исправной теплоизоляцией во время его движения изменяется несущественно.

Величина α_2 в значительной степени будет зависеть от наружных условий, при которых в данный момент эксплуатируется изотермическое транспортное средство.

Существует ряд методик [5, 6, 7, 8] для расчета коэффициента теплопередачи K, позволяющего найти среднее сопротивление ограждающих конструкций

$$R = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}.$$

Для этого требуется найти коэффициенты теплоотдачи от ограждающих конструкций (внутренней и наружной стенок ИВК). Классической методикой для нахождения указанных величин считается следующая критериальная зависимость для свободной конвекции [4]:

$$Nu = \varphi(GrPr) = \varphi(Ra),$$

где $Ra = GrPr$ — критерий Релея.

Критерий Грасгофа Gr характеризуется следующей зависимостью:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta t h^3}{\nu^2},$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; Δt — разность между температурой ограждающей конструкции и температурой окружающей среды, К; h — высота транспортного средства, м; ν — коэффициент кинематической вязкости окружающей среды, м²/с; β — температурный коэффициент объемного расширения жидкости, определяемый по формуле

$$\beta = \frac{1}{273{,}15 + \overline{t}},$$

где $\overline{t}$ — среднее значение между температурой ограждающей конструкции t_c и температурой окружающей среды t_o

$$\overline{t} = \frac{t_c + t_o}{2}.$$

Указанные зависимости справедливы для теплоотдачи при свободном движении капельной жидкости и газа. Экспериментальные данные по свободной конвекции капельной жидкости или газа около вертикальных пластин, горизонтальных и вертикальных цилиндров, шаров, помещенных в большой объем, обобщаются критериальной зависимостью

$$Nu = cRa^n,$$

в которой

$$Nu = \frac{\overline{\alpha} h}{\lambda},$$

где Nu — критерий Нуссельта, рассчитанный по среднему для всей поверхности значению коэффициента теплоотдачи $\overline{\alpha}$; λ — коэффициент теплопроводности окружающей среды, Вт/(м·К).

Величины коэффициентов c и n в формуле зависят от режимов течения и теплообмена воздуха в непосредственной близости от поверхности теплоотдачи и приведены в [4].

При использовании этой методики величина коэффициентов теплоотдачи находится в пределах от 2 до 8 Вт/(м²·К) в зависимости от разности температур между ограждающей поверхностью и окружающей средой.

Классической для определения коэффициента теплоотдачи от наружной стенки движущегося изотермического транспортного средства к окружающей среде считается критериальная зависимость

$$\overline{Nu}_l = 0{,}037 \mathrm{Re}_l^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25},$$

где

$$\overline{Nu}_l = \frac{\overline{\alpha} l}{\lambda};$$

$$\mathrm{Re}_l = \frac{w_0 l}{\nu},$$

где l — длина вагона или контейнера, м; w_0 — скорость поезда, м/с; $Pr = \nu / a$ и $Pr_c = \nu_c / a_c$ — критерии Прандтля, рассчитанные для воздуха при температурах окружающей среды и ограждающей конструкции соответственно (a, a_c — коэффициенты температуро-

проводности воздуха при температурах окружающей среды и ограждающей конструкции соответственно, $м^2/с$).

Для приближенного определения наружного коэффициента теплоотдачи могут быть применены эмпирические формулы [9, 10, 11]. Для ИВК увеличение скорости движения до 100 км/ч приводит к возрастанию значения α_2 до 45 Вт/($м^2$·К) (при расчете по критериальным зависимостям) и до 40–117 Вт/($м^2$·К) (при использовании указанных выше эмпирических формул). Коэффициент теплопередачи специализированного транспортного средства при этом неминуемо изменится в большую сторону на 3–10 %.

В пассажирских вагонах при увеличении скорости движения воздушных масс тоже наблюдается значительное увеличение коэффициента теплопередачи кузова, что отмечено в [9].

Влияние солнечной радиации на тепловой режим в изотермическом подвижном составе. Влияние солнечной радиации на тепловой режим в изотермическом подвижном составе подробно описано в [11] и практически не учитывается в [2]. Интенсивность прямой солнечной радиации рекомендуется рассчитывать по формуле Кастрова — Савинова [11]. Условное повышение наружной температуры, эквивалентное тепловому воздействию солнечной радиации, может быть найдено по формуле

$$\Delta t_{рад} = \frac{\rho}{\alpha_2}\left(I_{кр}\bar{H}_{кр} + I_{ст}\bar{H}_{ст}\right),$$

где ρ — коэффициент поглощения солнечных лучей поверхностью ограждения вагона (при расчетах обычно принимается равным 0,7); $I_{кр}$, $I_{ст}$ — полная интенсивность солнечной радиации на крыше и боковой стене вагона соответственно; $\bar{H}_{кр}$, $\bar{H}_{ст}$ — относительные доли площадей крыши и боковой стены в общей площади наружной поверхности изотермического вагона соответственно.

По результатам расчетов условное повышение наружной температуры, эквивалентное тепловому воздействию солнечной радиации, может составлять до 15 °С.

Здесь необходимо помнить, что с возрастанием скорости движения поезда, с одной стороны, растет коэффициент теплоотдачи на наружной стороне ИВК, с другой — ослабляется влияние солнечной радиации.

Повышение влажности воздуха, туман, а также атмосферные осадки в виде дождя или снега тоже увеличивают коэффициент теплоотдачи от наружных ограждающих поверхностей ИВК. При этом температура осадков может быть как выше температуры окружающего воздуха, так и ниже нее, что, безусловно, окажет влияние на температуру стенки и, соответственно, на тепловой поток.

Заключение. Действующая Методика в полной мере не учитывает влияние погодных условий и других внешних факторов при расчете предельного срока перевозки скоропортящихся грузов в изотермических транспортных средствах. В связи с этим возникает необходимость ее доработки.

Актуализированная методика расчета должна:

• максимально точно определять предельные сроки перевозки скоропортящихся грузов в применяемых изотермических транспортных средствах;

• позволять оценивать изменение температуры внутри изотермических транспортных средств во время рейса.

Учет реальных внешних факторов, в частности температуры наружного воздуха, влажности, скорости движения поезда, существенно влияет на величину коэффициента теплопередачи кузова изотермического транспортного средства, значение которого, определяемое в стационарных условиях цеха и лежащее в основе расчета предельно допустимых сроков перевозки скоропортящихся грузов, отлично от действительного значения.

Как показывают предварительные расчеты, учет внешних факторов позволяет скорректировать предельные сроки перевозки скоропортящихся грузов на 3–10 % от его величины, рассчитанной по действующей Методике.

Внесение изменений в Методику позволит снизить риск доставки скоропортящихся грузов ненадлежащего качества вследствие некорректно рассчитанного предельного срока перевозки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) [Электронный ресурс] / ООН. Нью-Йорк; Женева, 2015. URL: http://docs.cntd.ru/document/902076335 (дата обращения: 04.01.2020 г.).

2. Типовая методика по установлению температурных режимов и предельных сроков перевозки ОАО «РЖД» новых видов скоропортящихся грузов в изотермических транспортных средствах, кроме изотермических цистерн и контейнеров-цистерн, на особых условиях: утв. вице-президентом ОАО «РЖД» от 04.12.2012 г. № 355.

3. Исаченко В. П., Омпова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: [учеб.]. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоиздат, 1981. 417 с.

4. Минаев Б. Н., Мокриденко Г. П., Левенталь Л. Я. Теплоэнергетика железнодорожного транспорта: справ.-метод. пособ. М.: МИИТ, 2006. 345 с.

5. ГОСТ 33661–2015. Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200130100 (дата обращения: 04.01.2020 г.).

6. Теймуразов Н. С., Науменко С. Н. Ускоренные методы оценки коэффициента теплопередачи кузовов изотермических транспортных средств // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 5. С. 18–21.

7. Голубин А.А., Набатчикова Т.И., Науменко С.Н. Технология автоматизированного расчета коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства с использованием удаленного сервера // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 4. С. 233–240. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-233-240.

8. Давыдов Д. О. Методика расчета общего коэффициента теплопередачи кузова специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 4. С. 249–256. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-249-256.

9. Самошкин С.Л., Мейстер А.О., Юхневский М.А. Методические вопросы определения среднего коэффициента теплопередачи кузовов пассажирских вагонов // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 6. С. 344–350. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-6-344-350.

10. Левенталь Л.Я., Костин А.В. Энергетика рефрижераторных и пассажирских вагонов. М.: МИИТ, 1998. 91 с.

11. Бартош Е.Т. Энергетика изотермического подвижного состава. М.: Транспорт, 1976. 304 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

НАБАТЧИКОВА Татьяна Игоревна,
аспирант, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

НАУМЕНКО Сергей Николаевич,
д-р техн. наук, начальник отдела Центра электрификации и теплоэнергетики, АО «ВНИИЖТ»

ГУСЕВ Глеб Борисович,
канд. техн. наук, доцент, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 05.01.2020 г., принята к публикации 16.03.2020 г.

Для цитирования: Набатчикова Т. И., Науменко С. Н., Гусев Г. Б. О влиянии внешних факторов на коэффициент теплопередачи кузова специализированного транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 2. С. 88–92. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-88-92.

On the influence of external factors on the heat transfer coefficient of the body of a specialized vehicle for the transportation of perishable freight

T. I. NABATCHIKOVA[1], S. N. NAUMENKO[2], G. B. GUSEV[1]

[1] Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO RUT (MIIT)), Moscow, 127994, Russia
[2] Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Satisfying the needs of the population in the delivery of perishable freight of good quality largely depends on the stable operation of specialized vehicles and the accuracy of calculating the deadline for transporting freight to the consumer. The main value used to calculate the deadline for the transportation of perishable freight by rail is the heat transfer coefficient of the body of an insulated car or container. The accuracy of estimating this value is especially important when using isothermal cars or containers that are not equipped with cooling or heating systems as specialized vehicles. In this paper authors assess the influence of some external factors on the value of the heat transfer coefficient of the body of an isothermal vehicle. The change in the heat transfer coefficient due to the influence of the speed of the isothermal vehicle and insolation is taken into account. The heat transfer coefficients from the internal and external building envelopes to the ambient air for the standing car and during its movement are determined to assess the change in the heat transfer coefficient from the criterion dependencies. Taking into account real external factors, in particular outdoor temperature, humidity, train speed, significantly affects the heat transfer coefficient of the body of an isothermal vehicle, the value was determined in stationary conditions of the workshop and underlying the calculation of the maximum permissible terms for the transportation of perishable freights. This value is excellent from the actual value. As a result of the calculations, a discrepancy of the value of the deadline for the transportation of perishable freights in comparison with the current method is 3–10 %.

Changes to the existing methodology will reduce the risk of delivery of perishable freight of inadequate quality due to incorrectly calculated deadlines for transportation.

Keywords: isothermal vehicle; specialized vehicle; heat transfer coefficient; thermal insulation; heat-protecting constructions of vehicles; car body; transportation of freight; heat transfer coefficient; insolation; air mass movement

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-88-92

REFERENCES

1. *Agreement on the international transport of perishable foodstuffs and on special vehicles intended for such transport (ATP).* URL: http://docs.cntd.ru/document/902076335 (retrieved on 04.01.2020) (in Russ.).

2. *Standard method for establishing temperature conditions and deadlines for the transportation of new types of perishable goods in isothermal vehicles in the Russian Railways, except for isothermal tanks and tank containers on special conditions.* Approved by Vice President of the Russian Railways dated December 4, 2012 No. 355 (in Russ.).

3. Isachenko V. P., Ompova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha. Uchebnik.* 4-e izd., pererab. i dop. [Heat transfer. Textbook. 4th edition, revised and amended]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 417 p.

4. Minaev B. N., Mokridenko G. P., Levental' L. Ya. *Teploenergetika zheleznodorozhnogo transporta. Sprav.-metod. posob* [Thermal energy of railway transport. Reference and methodological manual]. Moscow, MIIT Publ., 2006, 345 p.

5. GOST 33661–2015. *Building envelope of the railway rolling stock. Test methods for determination of thermal performance* URL: http://docs.cntd.ru/document/1200130100 (retrieved on 04.01.2020) (in Russ.).

6. Teymurazov N. S., Naumenko S. N. *Uskorennye metody otsenki koeffitsienta teploperedachi kuzovov izotermicheskikh transportnykh sredstv* [Accelerated methods for estimating the heat transfer coefficient of isothermal vehicle bodies]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2009, no. 5, pp. 18–21.

7. Golubin A. A., Nabatchikova T. I., Naumenko S. N. *Tekhnologiya avtomatizirovannogo rascheta koeffitsienta teploperedachi kuzova transportnogo sredstva s ispol'zovaniem udalennogo servera* [Technology of automated calculation of the heat transfer coefficient of a vehicle body using a remote server]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2019, Vol. 78, no. 4, pp. 233–240. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-233-240.

8. Davydov D. O. *Metodika rascheta obshchego koeffitsienta teploperedachi kuzova spetsial'nogo transportnogo sredstva dlya perevozki skoroportyashchikhsya gruzov* [Methodology for calculating the total heat transfer coefficient of the body of a special vehicle for the transport of perishable goods]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2019, Vol. 78, no. 4, pp. 249–256. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-249-256.

9. Samoshkin S. L., Meyster A. O., Yukhnevskiy M. A. *Metodicheskie voprosy opredeleniya srednego koeffitsienta teploperedachi kuzovov passazhirskikh vagonov* [Methodological issues of determining the average heat transfer coefficient of passenger car bodies]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2019, Vol. 78, no. 6, pp. 344–350. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-6-344-350.

10. Levental' L. Ya., Kostin A. V. *Energetika refrizheratornykh i passazhirskikh vagonov* [Energy of refrigerated and passenger cars]. Moscow, MIIT Publ., 1998, 91 p.

11. Bartosh E. T. *Energetika izotermicheskogo podvizhnogo sostava* [Energy of the isothermal rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1976, 304 p.

ABOUT THE AUTHORS

Tat'yana I. NABATCHIKOVA,
Post-graduate, Department "Railway Heat Power Engineering", FGAOU VO RUT (MIIT)

Sergey N. NAUMENKO,
Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of the Center for Electrification and heat power engineering, JSC "VNIIZhT"

Gleb B. GUSEV,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Railway Heat Power Engineering", FGAOU VO RUT (MIIT)

E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (S. N. Naumenko)

Received 05.01.2020
Accepted 16.03.2020

For citation: Nabatchikova T. I., Naumenko S. N., Gusev G. B. On the influence of external factors on the heat transfer coefficient of the body of a specialized vehicle for the transportation of perishable freight. Vestnik of the Railway Research Institute. 2020. 79 (2): 88–92 (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-88-92.

БИБЛИОТЕКА СПЕЦИАЛИСТА

Хладотранспорт и основы теплотехники / Ю. И. Матяш, В. П. Клюка, О. А. Ворон, С. Н. Науменко. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. 360 с.

В монографии рассмотрены вопросы, касающиеся рефрижераторного подвижного состава, эксплуатирующегося на железных дорогах России, обозначены пути его развития и совершенствования. С учетом современных достижений в области материаловедения предложены пути улучшения конструкции кузова рефрижераторных транспортных средств, позволяющие в значительной степени снизить коэффициент теплопередачи, практически исключить коррозию и обеспечить ресурс работы до 40 лет без ухудшения эксплуатационных показателей. Дано обоснование целесообразности использования рефрижераторных контейнеров для перевозки скоропортящихся грузов.

В данной книге изложены материалы для создания унифицированной системы электроснабжения рефрижераторных контейнеров и современных средств контроля, а также непрерывной регистрации основных режимов перевозимого скоропортящегося груза.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занятых в сфере организации и управления перевозками скоропортящихся грузов, аспирантов и студентов вузов железнодорожного профиля, а также широкого круга лиц, интересующихся вопросами развития рефрижераторных перевозок в России и за рубежом.