

Разработка системы кондиционирования с индивидуальным регулированием температуры и расхода воздуха в купе пассажирского вагона

Г. М. СТОЯКИН¹, А. В. КОСТИН², С. Н. НАУМЕНКО³

¹Общество с ограниченной ответственностью «Проектное бюро АПЕКС» (ООО «Проектное бюро АПЕКС»), Москва, 115114, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127055, Россия

³Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Поддержание оптимальных параметров микроклимата в вагоне в пути следования является важнейшим требованием при перевозке пассажиров. В пассажирских вагонах повышенной комфортности поддержание оптимальных параметров микроклимата достигается путем функционирования системы кондиционирования воздуха, обеспечивающей индивидуальное регулирование температуры воздуха в каждом купе. Системы индивидуального регулирования температуры воздуха, применяемые в системах кондиционирования воздуха, разделяют на две группы: активные и пассивные.

В статье предлагается к рассмотрению комбинированная активно-пассивная система с отдельной подачей воздуха с более низкой и более высокой по сравнению с поддерживаемой в купе температурой и установкой индивидуальных эжекционных доводчиков, позволяющая повысить эффективность индивидуального регулирования параметров воздуха в купе.

Для оценки равномерности распределения температуры и скорости потока воздуха по объему вагона при предлагаемой схеме регулирования проведено трехмерное моделирование распределения этих параметров в купе на базе программного обеспечения Autodesk CFD.

Приведенные результаты моделирования свидетельствуют о равномерности распределения температуры и скорости потока воздуха по объему купе, что позволяет охарактеризовать предлагаемую систему как достаточно энергоэффективную, простую в управлении и надежную в эксплуатации.

Ключевые слова: пассажирский вагон; кондиционирование воздуха; система индивидуального регулирования; эжекционный доводчик; температура воздуха; скорость воздуха; эффективность системы

Введение. Обеспечение комфортного микроклимата в вагоне является одним из важнейших условий при перевозке пассажиров. В настоящее время параметры микроклимата в вагонах уступают параметрам, поддерживаемым в помещениях жилых и промышленных зданий [1, 2]. Это объясняется ограниченностью энергетических ресурсов, жесткими требованиями к массогабаритным характеристикам оборудования, установкой воздухораспределительных и отопительных устройств непосредственно в зоне расположения пассажиров в сочетании с невозможностью обеспечить теплотехнические характери-

стики кузова вагона на уровне стандартов, принятых в капитальном строительстве [3].

Системы индивидуального регулирования температуры воздуха в купе. В пассажирских вагонах повышенной комфортности устанавливается система кондиционирования воздуха (СКВ), обеспечивающая индивидуальное регулирование температуры воздуха в каждом купе в диапазоне температур 18–28 °С, что соответствует требованиям Санитарных правил по организации пассажирских перевозок в железнодорожном транспорте [4, 5]. Такое регулирование позволяет учесть личные предпочтения пассажиров, а также различия в теплопоступлениях в разных купе от людей, еды и т. п. СКВ должна быть максимально простой и надежной, компактной и эффективной, обеспечивать возможность регулирования температуры воздуха как в холодный период года, так и в теплый, обладать высокой энергоэффективностью и безопасностью для пассажиров.

Системы индивидуального регулирования температуры воздуха, применяемые в СКВ, разделяют на две группы: пассивные и активные [6]. В активных системах осуществляется прямое воздействие на температуру подаваемого в купе воздуха от некоторого дополнительного источника, например электронагревателя. В пассивных системах изменение температуры воздуха происходит за счет смешения с регулируемой пропорциональностью потоков воздуха с различной температурой перед подачей в купе, например смешение потоков свежего и рециркуляционного воздуха.

Считается, что активные системы более перспективны, так как обладают значительными преимуществами, обеспечивая более высокое качество и надежность при регулировании параметров воздуха.

Система индивидуального регулирования с отдельной подачей воздуха и эжекционными доводчиками. Для повышения эффективности индивидуального регулирования параметров воздуха в купе предла-

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

гается комбинированная активно-пассивная схема с отдельной подачей воздуха с более низкой и более высокой по сравнению с поддерживаемой в купе температурой и установкой индивидуальных эжекционных доводчиков, получающих в последнее время все большее применение в децентрализованных СКВ различных помещений. Местное регулирование температуры в купе осуществляется изменением расхода подаваемого воздуха. Нагрев или охлаждение подаваемого воздуха производится в рекуперативных теплообменниках. Теплопередающую поверхность теплообменника целесообразно выполнять либо из оребренных труб для повышения его компактности, либо из труб с продольными турбулизаторами [7] для снижения гидравлического сопротивления. Организовать переменный расход воздуха, подаваемого в каждое купе, целесообразно по датчику концентрации CO_2 как для обеспечения комфортных условий (не более 1000 ppm CO_2) и санитарных требований, так и с целью экономии энергетических ресурсов — за счет снижения подачи наружного воздуха в купе, не полностью заполненное пассажирами.

Схема подачи воздуха в купе приведена на рис. 1.

В предлагаемой схеме через нижний воздуховод, проложенный по стенке под окном, подается воздух с температурой, близкой к верхней границе допустимых параметров (в холодный период года — с незначительным перегревом), через верхний воздуховод подается низкоскоростным потоком воздух с температурой, близкой к нижней границе допустимых параметров (в теплый период года — с незначительным переохлаждением).

Оба воздуховода оборудуются заслонками с сервоприводами, управляемыми по датчикам температуры и концентрации CO_2 .

Регулирование подачи потока воздуха, задающего температуру в купе (летом — холодный воздух, зимой — перегретый), осуществляется заслонкой по датчику температуры. Управление второй заслонкой производится по датчику концентрации CO_2 , рассчитанному на постоянную концентрацию 1000 ppm, являющуюся достаточно комфортной для пассажиров [1–5].

Одним из достоинств предлагаемой схемы является то, что поддержание двух контролируемых параметров (содержание CO_2 и температура воздуха) осуществляется за счет независимого управления двумя исполнительными механизмами — заслонками на приточных воздуховодах.

При повышении по датчику температуры расхода воздуха в купе, обеспечивающего снятие теплоизбытков или теплопотерь, увеличивается и производительность эжекционных доводчиков. При этом в купе снижается содержание CO_2 , в результате чего по

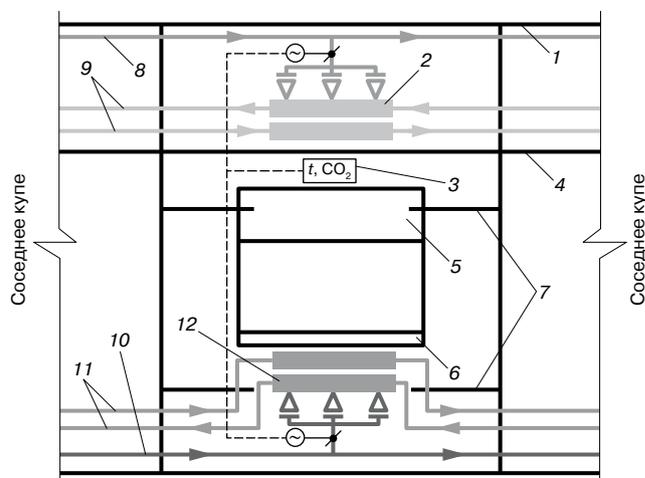


Рис. 1. Схема подачи воздуха в купе:
 1 — крыша вагона; 2 — верхний эжекционный доводчик;
 3 — датчик температуры и концентрации CO_2 ; 4 — потолок купе;
 5 — окно; 6 — откидной столик; 7 — пассажирские места;
 8 — воздух от установки кондиционирования воздуха (УКВ) для подачи в верхний эжекционный доводчик; 9 — холодоноситель (14–16 °C); 10 — воздух от УКВ для подачи в нижний эжекционный доводчик; 11 — теплоноситель (40–60 °C); 12 — нижний эжекционный доводчик

Fig. 1. Compartment air supply diagram:
 1 — car roof; 2 — upper induction terminal; 3 — sensor for temperature and CO_2 concentration; 4 — compartment ceiling;
 5 — window; 6 — folding table; 7 — passenger seats;
 8 — air from an air conditioning unit (ACU) for supply to the upper induction terminal; 9 — refrigerant (14–16 °C); 10 — air from ACU for supply to the lower induction terminal; 11 — coolant (40–60 °C); 12 — lower induction terminal

датчику CO_2 уменьшается расход воздуха, подаваемого из второго канала. Благодаря этому управление можно выполнить с максимально простой и надежной локальной автоматикой, без организации единой электронной системы, контролирующей параметры во всем вагоне и управляющей всеми исполнительными механизмами.

В отличие от вентиляторных доводчиков (фанкойлов и фреоновых блоков VRF-системы) эжекционные доводчики не имеют подвижных элементов, вместо вентилятора воздух из помещения забирается за счет эжекции [8]. Это обеспечивает высокую надежность и долговечность их работы, бесшумность при эксплуатации. Кроме того, применение доводчика с непосредственным испарением фреона нежелательно по соображениям безопасности: из-за малого объема купе в случае разгерметизации фреоновых проводов вероятно превышение допустимой аварийной концентрации хладагента в воздухе.

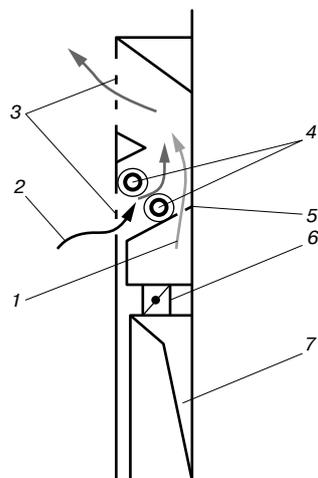
Работа эжекционного доводчика (рис. 2) основана на «эффекте трубки Вентури» [9] (захвате частиц воздуха из помещения струей воздуха, движущейся с высокой скоростью в соседнем сообщающемся канале).

Рис. 2. Схема эжекционного доводчика:

- 1 — наружный воздух;
- 2 — рециркуляционный воздух;
- 3 — решетки;
- 4 — оребренные трубки теплообменника;
- 5 — сопло;
- 6 — заслонка с сервоприводом;
- 7 — воздуховод

Fig. 2. Scheme of an induction terminal:

- 1 — outside air;
- 2 — recirculated air;
- 3 — grids;
- 4 — finned heat exchanger tubes;
- 5 — nozzle;
- 6 — servo-driven damper;
- 7 — air duct



Из воздуховода предварительно подготовленный наружный приточный воздух проходит с высокой скоростью через сопло и поступает в теплообменник, где эжектирует внутренний (рециркуляционный) воздух. Таким образом, рециркуляция воздуха происходит внутри каждого купе и не требуется прокладка общевагонного рециркуляционного воздуховода. Доводка температуры воздуха в купе до необходимых значений происходит при помощи изменения расхода приточного воздуха.

Регулирование производительности вентилятора СКВ вагона, подающего воздух в купе, осуществляется автономно по датчику давления, рассчитанному на поддержание постоянного давления после вентилятора, что позволяет учитывать изменения необхо-

димого расхода подаваемого воздуха без электронной синхронизации работы вентилятора и положения заслонок в купе.

Для оценки равномерности распределения температуры и скорости потока воздуха по объему вагона при предлагаемой схеме регулирования проведено трехмерное моделирование распределения этих параметров в купе на базе программного обеспечения Autodesk CFD (Computational Fluid Dynamics) [10]. Моделирование основано на решении численными методами дискретизированных уравнений аэродинамики и теплообмена. Численная модель включала в себя трехмерную модель купе с необходимой детализацией: граничные условия, учитывающие теплофизические свойства ограждений; детализированные модели воздухораспределителей; значения скорости потока и температуры приточного воздуха.

При моделировании принимались следующие параметры воздуха на выходе из верхнего воздухораспределителя: температура 16 °С и скорость 0,06 м/с; на выходе из нижнего воздухораспределителя: температура 24 °С и скорость 0,26 м/с, модель турбулентности $k-\varepsilon$.

На рис. 3 представлены результаты моделирования распределения температуры, а на рис. 4 — распределения скорости потока воздуха в характерных сечениях купе. Значения температуры и скорости потока воздуха обозначены оттенками серого цвета по градиентной шкале.

Как показывают результаты моделирования (рис. 3–4), при новой схеме подачи воздуха в купе вагона и направлений воздушных потоков наблюдается равномерное распределение температуры и скорости воздуха по объему помещения.

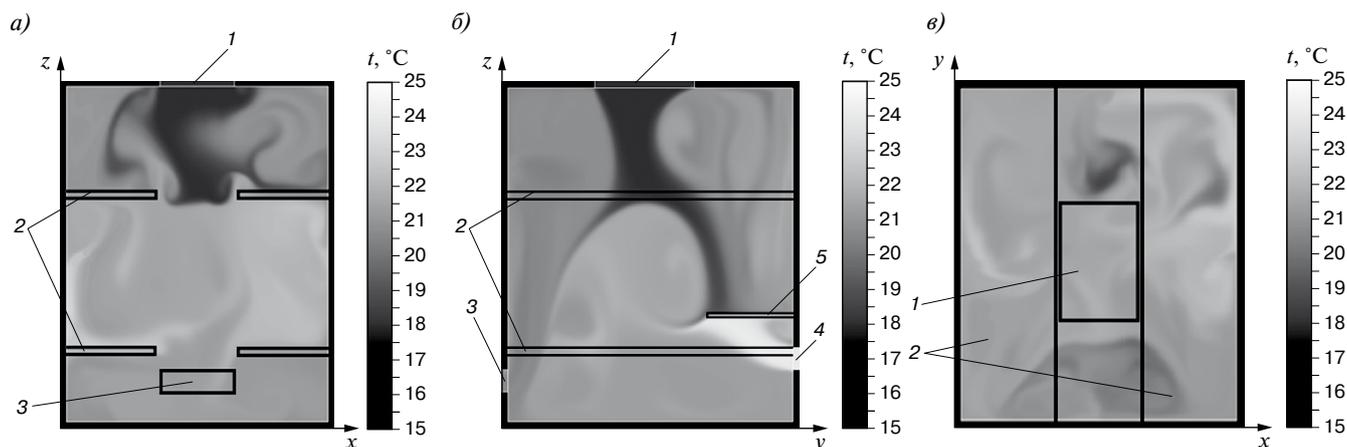


Рис. 3. Распределение температуры воздуха в купе:

- a* — торцевая стенка; *б* — боковая стенка; *в* — потолок; 1 — верхняя распределительная решетка; 2 — пассажирские места;
- 3 — перегородочная решетка; 4 — нижняя воздухораспределительная решетка; 5 — откидной столик; ось *x* — ширина купе;
- ось *y* — длина купе; ось *z* — высота купе

Fig. 3. Air temperature distribution in the compartment:

- a* — end wall; *б* — side wall; *в* — ceiling; 1 — upper distribution grid; 2 — passenger seats;
- 3 — transfer lattice; 4 — lower air distribution grid; 5 — folding table; *x*-axis — compartment width; *y*-axis — compartment length;
- z*-axis — compartment height

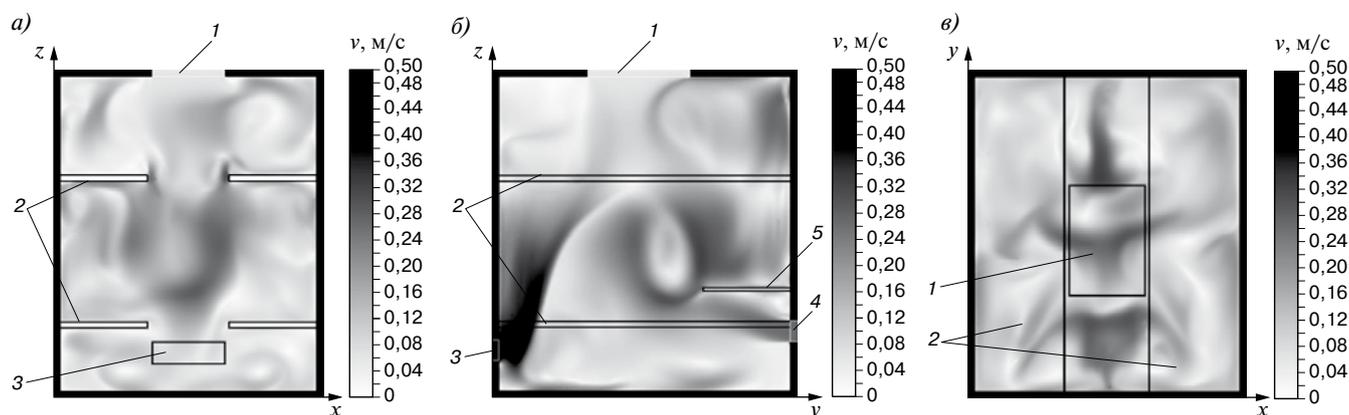


Рис. 4. Распределение скорости потока воздуха в купе:

a — торцевая стенка; *б* — боковая стенка; *в* — потолок; 1 — верхняя распределительная решетка; 2 — пассажирские места; 3 — перегородочная решетка; 4 — нижняя воздухораспределительная решетка; 5 — откидной столик; ось *x* — ширина купе; ось *y* — длина купе; ось *z* — высота купе

Fig. 4. Distribution of air speed in the compartment:

a — end wall; *б* — side wall; *в* — ceiling; 1 — upper distribution grid; 2 — passenger seats; 3 — transfer grid; 4 — lower air distribution grid; 5 — folding table; *x*-axis — compartment width; *y*-axis — compartment length; *z*-axis — compartment height

Заключение. Система индивидуального регулирования параметров кондиционирования воздуха в купе с эжекционными доводчиками проста в управлении, достаточно энергоэффективна и надежна в эксплуатации. Раздельная подача воздуха в купе по предлагаемой схеме обеспечивает равномерное распределение температуры и скорости воздуха по объему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стоякин Г.М., Костин А.В., Науменко С.Н. Пути улучшения характеристик климатических систем пассажирского подвижного состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79. № 1. С. 34–38. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-34-38>.
2. Стоякин Г.М., Костин А.В. Пути улучшения воздушной среды в пассажирских вагонах // Вопросы технических наук в свете современных исследований: сб. ст. по материалам II–III Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2017. № 2–3 (2). С. 5–12.
3. Стоякин Г.М., Костин А.В., Науменко С.Н. Пути повышения энергоэффективности климатических систем пассажирских вагонов // Проблемы безопасности на транспорте: сб. ст. по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Гомель: БелГУТ, 2019. Ч. 1. С. 318–320.
4. СП 2.5.1198–03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс]: утв. главным государственным санитарным врачом РФ от 3 марта 2003 года: дата введения 3 июня 2003 года: зарегистрировано в Минюсте РФ 1 апр. 2003 г., регистрац. № 4348 (с изменениями на 10 июня 2016 г.). URL: <http://doc.gzd.ru> (дата обращения: 15.01.2021 г.).
5. СП 2.5.2647–10. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте. Изменения и дополнения № 2 к СП 2.5.1198–03 [Электронный ресурс]: утв.

постановлением главного государственного санитарного врача РФ от 16 июня 2010 г. № 68: дата введения 12 июля 2010 г.: зарегистрировано в Минюсте РФ 7 июля 2010 г., регистрац. № 17750. URL: <https://rg.ru/2010/07/16/sanpraviladok.html> (дата обращения: 15.01.2021 г.).

6. Жариков В.А. Климатические системы пассажирских вагонов. М.: Трансинформ, 2006. 135 с.
7. Минаев Б.Н., Костин А.В., Стоякин Г.М. О влиянии искусственной турбулизации пограничного слоя на гидравлическое сопротивление пучка круглых труб, омываемых поперечным потоком вязкой среды // Наука и техника транспорта. 2012. № 2. С. 47–52.
8. Высоконадежная энергосберегающая климатическая система [Электронный ресурс]. URL: <https://e-n-e-r-g-o.ru> (дата обращения: 15.01.2021 г.).
9. Все про трубку Вентури [Электронный ресурс]. URL: <https://kipiavr.ru> (дата обращения: 15.01.2021 г.).
10. CFD-моделирование [Электронный ресурс]. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/gidrotekhnika/141978-cfd-modelirovanie> (дата обращения: 15.01.2021 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СТОЯКИН Григорий Михайлович, ведущий инженер по отоплению, вентиляции и кондиционированию, ООО «Проектное бюро АПЕКС»

КОСТИН Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», ФGAOU ВО «РУТ» (МИИТ)

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

Статья поступила в редакцию 26.01.2021 г., актуализирована 13.02.2021 г., принята к публикации 15.02.2021 г.

Для цитирования: Стоякин Г.М., Костин А.В., Науменко С.Н. Разработка системы кондиционирования с индивидуальным регулированием температуры и расхода воздуха в купе пассажирского вагона // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 1. С. 30–34. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-30-34>.

Development of an air conditioning system with individual regulation of temperature and air flow rate in a compartment of a passenger car

G. M. STOYAKIN¹, A. V. KOSTIN², S. N. NAUMENKO³

¹Limited Liability Company "Design Bureau APEKS" (LLC "Design Bureau APEKS"), Moscow, 115114, Russia

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO "RUT" (MIIT)), Moscow, 127055, Russia

³Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Maintaining optimal parameters of the microclimate in the car along the route is the most important requirement for the passenger's travel. In the 1st class passenger cars, maintaining optimal microclimate parameters is achieved through the operation of the air conditioning system, which provides individual regulation of the air temperature in each compartment. Individual air temperature control systems used in air conditioning systems are divided into two groups: active and passive.

The article proposes for consideration a combined active-passive system with a separate air supply with a lower and higher temperature compared to the temperature maintained in the compartment and the installation of individual induction terminals, which makes it possible to increase the efficiency of individual regulation of air parameters in the compartment.

To assess the uniformity of temperature distribution and air flow rate over the car volume with the proposed control scheme, a three-dimensional modeling of the distribution of these parameters in the compartment was carried out on the basis of Autodesk CFD software.

The given simulation results indicate the uniformity of temperature and air flow rate distribution over the compartment volume, which makes it possible to characterize the proposed system as sufficiently energy efficient, easy to operate and reliable in operation.

Keywords: passenger car; air conditioning; individual regulation system; induction terminal; air temperature; air speed; system efficiency

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-30-34>

REFERENCES

1. Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. *Puti uluchsheniya kharakteristik klimaticheskikh sistem passazhirskogo podvizhnogo sostava* [Ways to improve characteristics of the climate systems of passenger rolling stock]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2020, Vol. 79, no. 1, pp. 34–38. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-34-38>.

2. Stoyakin G. M., Kostin A. V. *Puti uluchsheniya vozduшной среды в пассажирских вагонах* [Ways to improve the air environment in passenger cars]. *Voprosy tekhnicheskikh nauk v svete sovremennykh issledovaniy*. Cb. st. po materialam II–III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Problems of technical sciences in the light of modern research. Coll. of articles based on the materials of the II–III International scientific and practical conference]. Novosibirsk, SibAK Publ., 2017, no. 2–3 (2), pp. 5–12.

3. Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. *Puti povysheniya energoeffektivnosti klimaticheskikh sistem passazhirskikh vagonov* [Ways to improve the energy efficiency of climatic systems of passenger cars]. *Problemy bezopasnosti na transporte*. Cb. st. po materialam IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. V 2 ch. / pod obshch. red. Yu. I. Kulazhenko [Problems of safety in transport. Coll.

of articles based on the materials of the IX International scientific and practical conference, in 2 parts. Edited by Yu. I. Kulazhenko]. Gomel', BelGUT Publ., 2019, Part 1, pp. 318–320.

4. SP 2.5.1198–03. *Sanitary rules for the organization of passenger transportation by rail*. Approved by the chief state sanitary doctor of the Russian Federation on March 3, 2003, date of introduction June 3, 2003, registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on April 1, 2003, reg. no. 4348. URL: <http://doc.rzd.ru> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

5. SP 2.5.2647–10. *Sanitary rules for the organization of passenger transportation by rail. Amendments and additions no. 2 to SP 2.5.1198–03*. Approved by the decree of the chief state sanitary doctor of the Russian Federation of June 16, 2010 No. 68, date of introduction July 12, 2010. URL: <https://rg.ru/2010/07/16/sanpravila-dok.html> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

6. Zharikov V. A. *Klimaticheskie sistemy passazhirskikh vagonov* [Climatic systems of passenger cars]. Moscow, Transinform Publ., 2006, 135 p.

7. Minaev B. N., Kostin A. V., Stoyakin G. M. *O vliyaniy iskusstvennoy turbulizatsii pogranichnogo sloya na gidravlichesкое сопротивление пучка круглых труб, омываемых поперечным потоком вязкой среды* [On the influence of artificial turbulization of the boundary layer on the hydraulic resistance of a bundle of round pipes washed by a transverse flow of a viscous medium]. *Science and Technology in Transport*, 2012, no. 2, pp. 47–52.

8. *Vysokonadezhnaya energosberegayushchaya klimaticheskaya sistema* [Highly reliable energy-saving climate system]. URL: <https://e-n-e-r-g-o.ru> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

9. *Vse pro trubku Venturi* [Everything about the Venturi tube]. URL: <https://kipiavp.ru> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

10. *CFD-modelirovanie* [CFD-modeling]. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/gidrotekhnika/141978-cfd-modelirovanie> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Grigoriy M. STOYAKIN,

Leading Engineer in Heating, Ventilation and Air Conditioning Issues, LLC "Design Bureau APEKS"

Aleksander V. KOSTIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Heat Power Engineering of Railway Transport", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Sergey N. NAUMENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of the Center for Electrification and Heat Power Engineering, JSC "VNIIZHT"

Received 26.01.2021

Revised 13.02.2021

Accepted 15.02.2021

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

For citation: Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. Development of an air conditioning system with individual regulation of temperature and air flow rate in a compartment of a passenger car // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 30–34 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-30-34>.