

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДХОДА

И.А. Трусевич

ORCID: 0000-0002-6092-8762 e-mail: trilal@bk.ru

АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения»

Курган, Россия

Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

Екатеринбург, Россия

С.В. Абдулов

ORCID: 0009-0003-1769-4520 e-mail: sincopa2004@mail.ru

АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения»

Курган, Россия

И.А. Тараторкин

ORCID: 0000-0003-3836-6238 e-mail: ig_tar@mail.ru

Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

Екатеринбург, Россия

В.Б. Держанский

ORCID: 0000-0003-1043-8340 e-mail: dvb_47@mail.ru

Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

Екатеринбург, Россия

Решается задача совершенствования конструкции системы кондиционирования перспективной транспортной машины. Серия расчетов проведена в программном пакете для инженерной симуляции на основе методов мультифизического моделирования STAR-CCM+. Определены основные подходы по разработке систем кондиционирования, в том числе, на ранних этапах проектирования и с применением методов численного моделирования. Выявлено несовершенство существующей методики проведения экспериментального исследования, в методику испытаний существующих и перспективных систем кондиционирования предложены изменения, обеспечивающие упрощение проведения и повышение точности получаемого результата.

По результатам серии симуляционных расчетов определены диаметры отверстий для получения равномерного распределения расхода воздуха через каждый патрубок, отклонение составляет не более 5 % от среднего, обеспечивающие, удовлетворяющие требованиям, значения скорости потока воздуха в зоне дыхания водителя и пассажиров при открытых и закрытых заслонках. Проведена экспериментальная оценка усовершенствованной системы кондиционирования, подтвердившая результаты моделирования.

Ключевые слова: кондиционирование; система: распределение воздуха; зона дыхания; кабина; транспортная машина; симуляция; CFD; анализ; верификация; экспериментальное исследование; прогнозирование; оценка; климат; комфорт.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трусевич, И.А. Совершенствование конструкции системы кондиционирования перспективной транспортной машины на основе расчетно-экспериментального подхода / И.А. Трусевич, С.В. Абдулов, И.А. Тараторкин, В.Б. Держанский // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 108-123. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_108. EDN: YAUXVT

IMPROVING DESIGN OF AIR CONDITIONING SYSTEM OF PROMISING TRANSPORT VEHICLE BASED ON CALCULATION AND EXPERIMENTAL APPROACH

I.A. Trusevich

ORCID: **0000-0002-6092-8762** e-mail: **trilal@bk.ru**

Joint-stock Company «Special design Bureau of machine building»

Kurgan, Russia

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

S.V. Abdulov

ORCID: **0009-0003-1769-4520** e-mail: **sincopa2004@mail.ru**

Joint-stock Company «Special design Bureau of machine building»

Kurgan, Russia

I.A. Taratorkin

ORCID: **0000-0003-3836-6238** e-mail: **ig_tar@mail.ru**

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

V.B. Derzhansky

ORCID: **0000-0003-1043-8340** e-mail: **dvb_47@mail.ru**

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

Abstract. The article addresses the problem of improving the design of the air conditioning system of a promising transport vehicle. A series of simulation calculations are performed in the STAR-CCM+ software package for engineering simulation based on multiphysics modeling methods. The main approaches to the development of air conditioning systems are defined, including at the early stages of design and using numerical modeling methods. The existing methodology for conducting experimental research is imperfect, therefore, changes to the testing process of existing and prospective air conditioning systems are proposed, ensuring simplification of the procedure and increasing the accuracy of the obtained results.

Based on the results of a series of simulation calculations, the diameters of the holes were determined to obtain a uniform distribution of air flow through each branch pipe. The deviation is no more than 5% of the average. The calculated values provide air flow velocities in the breathing zone of the driver and passengers with the flaps open and closed that meet the requirements. An experimental assessment of the improved air conditioning system was carried out, confirming the results of the simulation.

Key words: air conditioning; system; air distribution; breathing area; cabin, transport vehicle; simulation; CFD; analysis; verification; experimental study; prediction; estimation; climate; comfort.

FOR CITATION: I.A. Trusevich, S.V. Abdulov, I.A. Taratorkin, V.B. Derzhansky. Improving design of air conditioning system of promising transport vehicle based on calculation and experimental approach. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 108-123. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_108. EDN: YAUXVT

Введение

Важным направлением текущих и перспективных исследований в области машиностроения является не только улучшение эксплуатационных характеристик транспортных машин, но и повышение уровня комфорта для водителя и пассажиров. При этом, помимо работ, посвященных снижению уровня шума и вибрации [1-3], важным направлением является обеспечение нормальной вентиляции, отопления и кондиционирования салона. Это достигается не только за счет разработки и внедрения более эффективных блоков обработки воздуха, но и совершенствования трасс систем забора и распределения. Кабины транспортных

машин, как правило, имеют ограниченные размеры, обеспечивающие сравнительно малый внутренний объем для водителя и пассажиров [4]. При отсутствии или недостаточности вентиляции, внутри быстро накапливаются двуокись углерода и вредные вещества, повышаются влажность и температура, которая, также, увеличивается и под воздействием солнечной радиации, нагрева двигателя, трансмиссии и других агрегатов [5-7]. Данные факторы, как по отдельности, так и в совокупности, могут привести к проявлению целого ряда нежелательных симптомов у находящихся в кабине людей – возникновению головной боли, раздражению слизистых оболочек, уменьшению внимания, точности и скорости реакции, повышению утомляемости. Все это, в свою очередь, приводит к снижению работоспособности лица, управляющего машиной, и, как следствие, увеличению вероятности возникновения аварийных ситуаций. С целью их предотвращения в реальных условиях вводятся дополнительные перерывы для водителя, что, в свою очередь, снижает общую эффективность эксплуатации транспортного средства.

Системы кондиционирования, обеспечивающие охлаждение, обогрев и вентиляцию салона, широко распространены в авиационной, автомобильной, железнодорожной и морской технике. Много работ посвящено рассмотрению существующих способов и подходов [8-10], применению различных компоновочных и конструктивных решений [11-12], разработке алгоритмов и систем управления [13-15], диагностике и анализу работоспособности [16-17], оценке непосредственного теплового состояния на основе моделирования теплопереноса [18], прочностному анализу элементов [19]. Существенное количество поздних исследований направлены на разработку и совершенствование систем кондиционирования электрических автомобилей [20-23]. Главный акцент в них, как правило, делается на повышение общей энергоэффективности агрегатов, но рассматривается полный спектр вопросов, актуальных и для обычных транспортных средств: проектирование и оптимизация систем кондиционирования [24-28], стратегия эксплуатации и исследование эффективности [29-32], внедрение интегрированных систем терморегулирования [33-35], экспериментальная проверка и доводка новых разработок [36-38], проектирование и оптимизация ключевых компонентов [39-40], повышение эффективности теплопередачи теплообменников [41-42], разработка систем управления [43-45], оценка тепловой обстановки в салоне и характеристик в течение жизненного цикла [46-49].

Целью данной работы является разработка модели для прогнозирования и совершенствования функционирования системы кондиционирования кабины перспективной транспортной машины.

Задачами исследования являются:

- экспериментальное определение величин скоростей потока воздуха в зоне дыхания водителя и пассажиров и на выходе из патрубков системы распределения для открытого и закрытого положения заслонки дефлектора в условиях объекта;
- разработка симуляционной модели системы кондиционирования и ее верификация на основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных;
- предложение комплекса мер по совершенствованию рассматриваемой системы.

Условия моделирования

Согласно стандарту на системы обеспечения микроклимата для автомобильных транспортных средств, подвижность воздуха в зоне дыхания не должна превышать 1,0 м/с. Второе требование к системе кондиционирования, определяющее необходимость обеспечения равномерного расхода воздуха по патрубкам и реализуемое в ходе данной работы, обусловлено первым и рациональным подходом к общим вопросам конструирования. Расчетное исследование осуществлялось в многофункциональном программном продукте для мультифизического моделирования STAR-CCM+. Трасса смоделирована в соответствии с конструкторской документацией, без учета допусков и отклонений. На рис. 1 представлена принципиальная расчетная модель рассматриваемой конструкции.

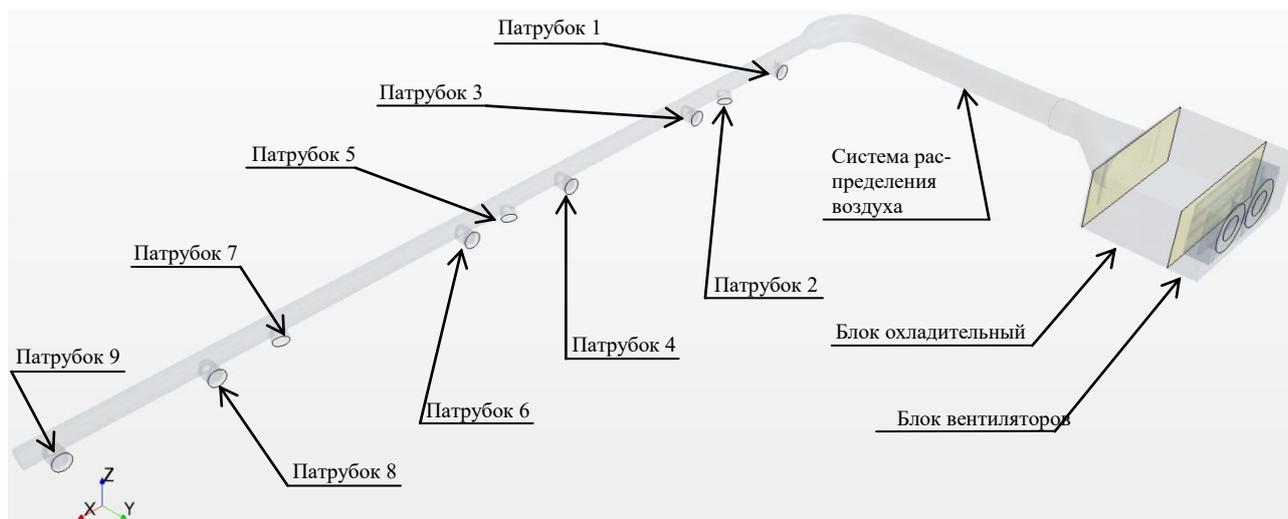


Рис. 1. Принципиальная расчетная модель системы кондиционирования

Fig. 1 The basic calculation model of the air conditioning system

Основные симуляционные расчеты проводились для воздуха с динамическим коэффициентом вязкости ($\mu = 1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с) и плотностью ($\rho = 1,18415$ кг/м³), соответствующими температуре 297° К. Расчетная область была разбита на многогранные элементы с применением призматического слоя, базовый размер 20 мм, относительный минимум размера – 20 %, число призматических слоев – 3, а общее число ячеек ≈ 500 тыс. Выбор типа и параметров сетки обусловлен серией предварительных сравнительных расчетов для обеспечения необходимой сходимости и минимизации требуемого расчетного времени. Исходное качество сетки определялось по минимуму качества грани (0,51), минимальному качеству ячейки (1,0E-8), минимальному изменению объема (1,0E-10), минимуму смежных ячеек (1), минимальной площади присоединенной грани (0,0 м²) и минимуму объема (0,0 м³) и подтвердило удовлетворительные показатели – несоответствующих требованиям ячеек не найдено.

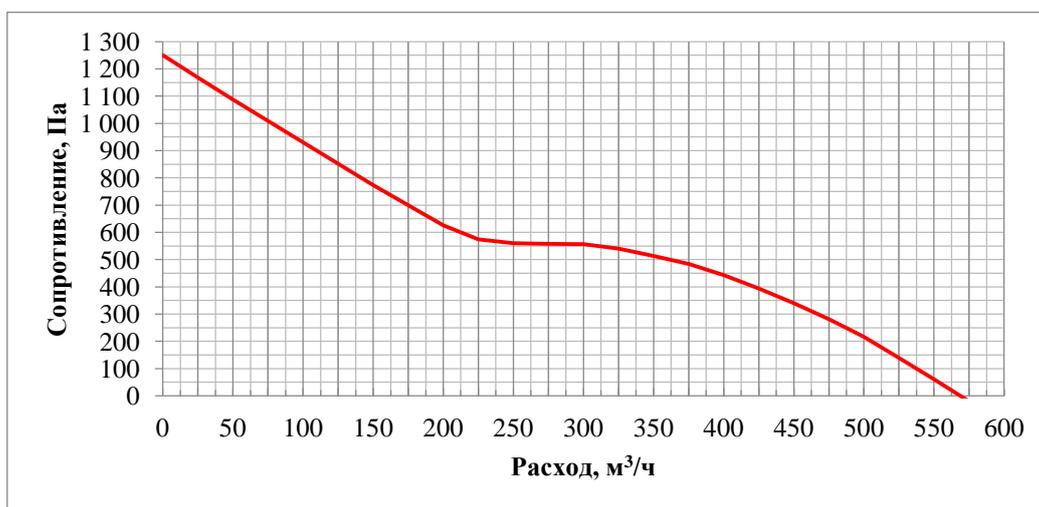


Рис. 2. Характеристика вентилятора 4114N/2H8P

Fig. 2. 4114N/2H8P fan specifications

Для моделирования использовались стационарный режим и решатель разделенного потока, сжимаемость среды не учитывалась. В качестве метода определения связи *давление – скорость* был выбран алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Турбулентность потока описывалась моделью *k-ε*. Используемые типы границ – массовый расход на входе, стенка, внутренний интерфейс, плоскость симметрии, давление на выходе.

Инициализация решения выполнялась встроенным инструментом используемого программного продукта. В качестве граничных условий заданы давление на выходе, соответствующее атмосферному (101325 Па) и расход на входе, определяемый по характеристике вентилятора 4114N/2H8P (рис. 2) в зависимости от сопротивления трассы.

Анализ сходимости, выполнявшийся как посредством встроенных инструментов используемого программного продукта, так и путем оценки изменения величин давлений и массовых расходов, показал достаточную степень достоверности и стабильности. Невязки по итерациям менее 0,01. Полноценное моделирование сложной внутренней конфигурации охладительного блока было заменено пористым представлением данной части расчетной области, связанной с другими внутренними интерфейсами. На основании экспериментально определенных показателей подбирались величины компонентов тензоров главных напряжений вязкого и инерционного сопротивления пористости, обеспечивающие достоверность симуляции во всем рассматриваемом диапазоне. Ранее выполнялось аналогичное исследование для прорабатываемого варианта системы распределения воздуха с меньшим количеством и иным расположением патрубков, однако последовавшие изменения конструкции оказали значимое влияние на ключевые рассматриваемые показатели. Моделирование текущей конструкции выявило существенные различия расхода воздуха через каждый патрубок.

Экспериментальное исследование и верификация модели

Экспериментальное исследование по замеру скорости потока воздуха из труб системы кондиционирования проводилось в составе изделия – перспективной транспортной машины. Для определения величин скорости потока воздуха в зоне дыхания и на выходе из патрубков раздачи использовался анемометр *Testo 417-2*. Замеры проводились в зоне дыхания водителя и пассажиров – на расстоянии 300 мм от подголовника и на высоте 700 мм от подушки сидения, в соответствии с антропометрическими данными, используемыми для технического проектирования. Скорость потока воздуха измерялась для двух случаев – заслонки дефлекторов открыты (положение параллельно потоку) и закрыты (положение перпендикулярно потоку). Помимо этого, в ходе эксперимента были выполнены замеры объемного расхода воздуха после охладительного блока – перед входом в трассу раздачи воздуха, которая была демонтирована. Это позволило учесть сопротивление охладительного блока без непосредственного моделирования сложной внутренней конструкции, как уже было описано выше.

В табл. 1 приведены величины скорости воздуха на выходе из дефлекторов раздачи воздуха, полученные экспериментальным и расчетным путем, а также их расхождение в %, для трех режимов работы кондиционера по расходу воздуха.

Таблица 1.
Сравнение скорости потока воздуха на выходе из дефлекторов раздачи воздуха

Table 1.
Comparison of air flow velocity at the outlet of air distribution deflectors

| Наименование | Патрубок | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 режим | | | | | | | | | |
| Экспериментальное значение, м/с | 1,08 | 0,98 | 1,41 | 0,94 | 1,88 | 1,57 | 1,58 | 2,98 | 1,65 |
| Расчетное значение, м/с | 1,17 | 0,97 | 1,23 | 0,94 | 1,86 | 1,50 | 2,57 | 2,87 | 1,60 |
| Расхождение, % | -8,05 | 1,01 | 12,83 | 0,25 | 1,21 | 4,23 | -62,94 | 3,75 | 3,16 |
| 2 режим | | | | | | | | | |
| Экспериментальное значение, м/с | 1,56 | 1,40 | 1,62 | 1,95 | 1,29 | 2,68 | 2,15 | 4,14 | 2,38 |
| Расчетное значение, м/с | 1,46 | 1,40 | 1,54 | 1,73 | 1,04 | 2,39 | 3,43 | 3,75 | 2,10 |
| Расхождение, % | 6,15 | -0,34 | 4,74 | 11,10 | 19,05 | 10,64 | -59,58 | 9,34 | 11,94 |
| 3 режим | | | | | | | | | |
| Экспериментальное значение, м/с | 2,32 | 1,92 | 2,46 | 1,90 | 4,92 | 3,36 | 3,07 | 5,81 | 3,37 |
| Расчетное значение, м/с | 2,38 | 1,92 | 2,54 | 1,90 | 3,96 | 3,24 | 5,67 | 3,58 | 3,08 |
| Расхождение, % | -2,51 | 0,21 | -3,21 | 0,25 | 19,54 | 3,62 | -84,56 | 21,23 | 8,52 |

Сходимость результатов расчетного и экспериментального исследования по большинству патрубков на всех режимах работы свидетельствует о удовлетворительной степени достоверности разработанной модели. Наличие отдельных выбросов объясняется, в первую очередь, несовершенством существующей методики проведения экспериментального исследования – испытатель располагался в кабине и поочередно проводил замеры у каждого патрубка, держа анемометр в руках. При таком подходе удобство расположения каждого патрубка оказывает влияние на получаемый результат. Это подтверждают существенные различия, обнаруженные для патрубка 7 на всех режимах и для патрубка 5 на режимах 2 и 3. Они, как и патрубок 2, были внесены в конструкцию позже и не учитывались при установке деталей и изделий внутри кабины, поэтому доступ к ним затруднен, что осложняет и корректное проведение замеров. Рекомендовано в дальнейшем при проведении испытаний и экспериментальных исследований применять специализированный штатив или проверять функционирование системы в стендовых условиях.

В табл. 2 приведены величины скорости воздуха в зоне дыхания водителя и пассажиров, полученные экспериментальным и расчетным путем, а также их расхождение в %, для трех режимов работы кондиционера по расходу воздуха. Наблюдается высокая сходимость величин скорости потока воздуха в зоне дыхания водителя при открытых заслонках и приемлемые расхождения исследуемого показателя при открытых заслонках для пассажира в центре. Кратная разница скоростей потока воздуха в зоне дыхания пассажира справа при открытых заслонках на режимах 2 и 3 может быть объяснена только значительным смещением области измерения, при проведении экспериментального исследования, от потоков, формируемого патрубками 1 и 3.

Таблица 2.
Сравнение скорости потока воздуха в зоне дыхания

Table 2.
Comparison of air flow velocity in the breathing zone

| Наименование | Водитель | | Пассажир в центре | | Пассажир справа | |
|---------------------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Заслонки открыты | Заслонки закрыты | Заслонки открыты | Заслонки закрыты | Заслонки открыты | Заслонки закрыты |
| 1 режим | | | | | | |
| Экспериментальное значение, м/с | 0,26 | 0,0 | 0,71 | 0,50 | 0,28 | 0,65 |
| Расчетное значение, м/с | 0,27 | 0,17 | 0,54 | 0,21 | 0,27 | 0,14 |
| Расхождение, % | -3,85 | | 23,94 | 58,00 | 3,57 | 78,46 |
| 2 режим | | | | | | |
| Экспериментальное значение, м/с | 0,45 | 0,0 | 0,90 | 0,34 | 0,15 | 0,67 |
| Расчетное значение, м/с | 0,48 | 0,35 | 1,03 | 0,33 | 0,89 | 0,21 |
| Расхождение, % | -6,67 | | -14,44 | 2,94 | -493,33 | 68,66 |
| 3 режим | | | | | | |
| Экспериментальное значение, м/с | 0,82 | 0,0 | 1,10 | 0,8 | 0,16 | 0,85 |
| Расчетное значение, м/с | 0,83 | 0,58 | 1,26 | 0,44 | 1,58 | 0,32 |
| Расхождение, % | -1,22 | | -14,55 | -81,82 | -887,5 | 62,35 |

В целом показатели, полученные расчетным путем, выглядят более логичными и закономерными, а существенные расхождения экспериментальных величин, в том числе и между собой, объясняются ошибками при проведении и несовершенством постановки испытаний. Большие расхождения, полученные для водителя и пассажиров при закрытых дефлекторах, помимо написанного выше, могут объясняться допусками и погрешностями при изготовлении, влияние которых существенно возрастает при значительном уменьшении сечения.

Результаты моделирования

После проведения верификации для обеспечения равномерного распределения воздуха были внесены изменения в конструкцию – итерационно подобраны внутренние диаметры патрубков. Сравнительные результаты моделирования базовой и доработанной конструкции приведены в табл. 3. Дальнейшее уменьшение отклонений расхода по каждому из патрубков можно достичь за счет перехода на дробные диаметры, либо внесения существенных изменений в текущую конструкцию узла, что повлечет за собой усложнение производственных процессов при незначительном улучшении исследуемых показателей.

Таблица 3.
Результаты расчета
Table 3.
Calculation results

| Наименование | Патрубок | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Базовая конструкция | | | | | | | | | |
| Диаметр отверстия, мм | 35 | 35 | 29 | 24 | 35 | 24 | 35 | 20 | 20 |
| Расход, м ³ /ч | 4,99 | 6,54 | 7,63 | 7,45 | 24,08 | 21,13 | 54,68 | 25,95 | 27,53 |
| Отклонение, % | -75,05 | -67,29 | -61,84 | -62,75 | 20,42 | 5,70 | 173,39 | 29,76 | 37,66 |
| Доработанная конструкция | | | | | | | | | |
| Диаметр отверстия, мм | 35 | 25 | 21 | 20 | 19 | 18 | 18 | 17 | 17 |
| Расход, м ³ /ч | 18,66 | 19,85 | 18,50 | 19,36 | 18,70 | 18,89 | 19,17 | 18,97 | 20,07 |
| Отклонение, % | -2,46 | 3,77 | -3,27 | 1,22 | -2,25 | -1,25 | 0,19 | -0,83 | 4,89 |

Для определения величин скорости потока воздуха в зоне дыхания в расчетной модели учитывался внутренний объем кабины. Искомые показатели определялись путем осреднения по поверхности поля скоростей в характерных областях диаметром 100 мм, в соответствии с методикой и условиями проведения экспериментального исследования. Верифицированная модель системы кондиционирования позволила предсказать величины скорости потока воздуха в зоне дыхания. На рис. 3-5 показаны поля скоростей в зоне дыхания водителя и пассажиров, где закрашенная фиолетовым цветом окружность – область измерения.

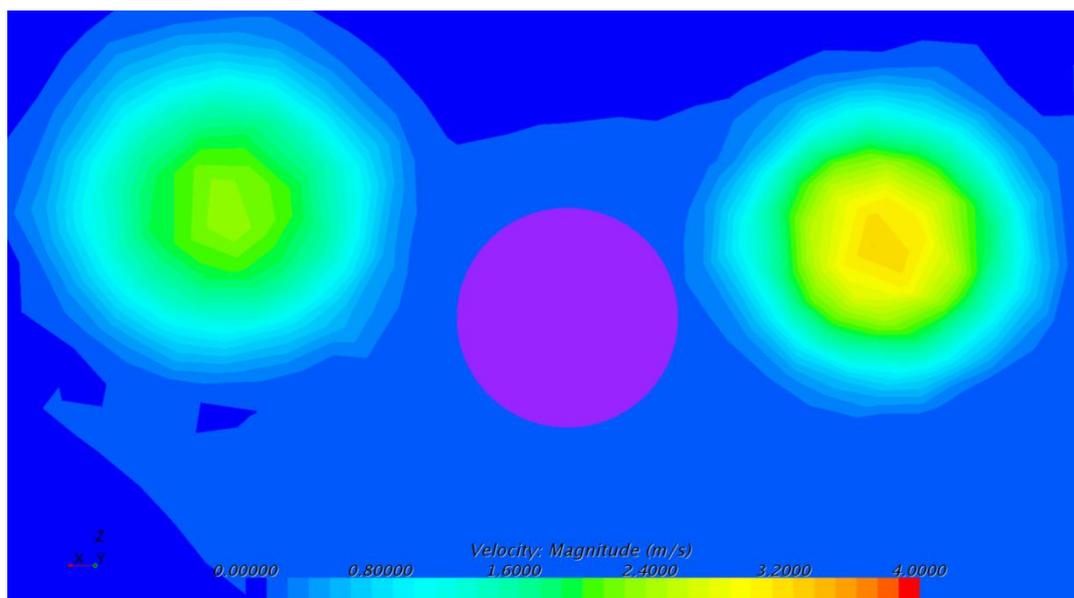


Рис. 3. Поле скоростей в зоне дыхания водителя
Fig. 3. Velocity field in the driver's breathing zone

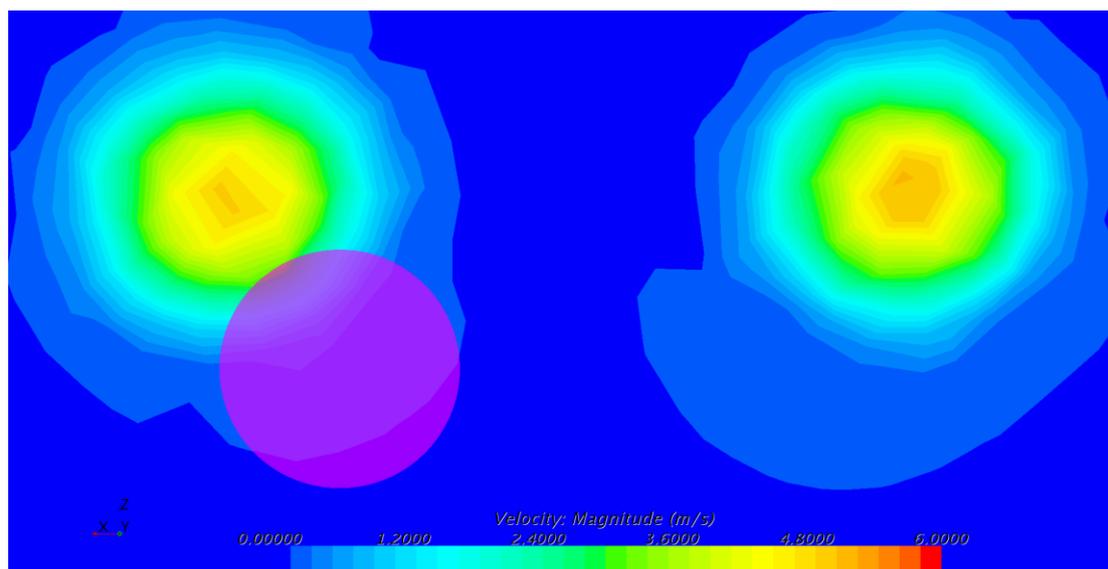


Рис. 4. Поле скоростей в зоне дыхания пассажира в центре
Fig. 4. Velocity field in the breathing zone of the passenger in the center

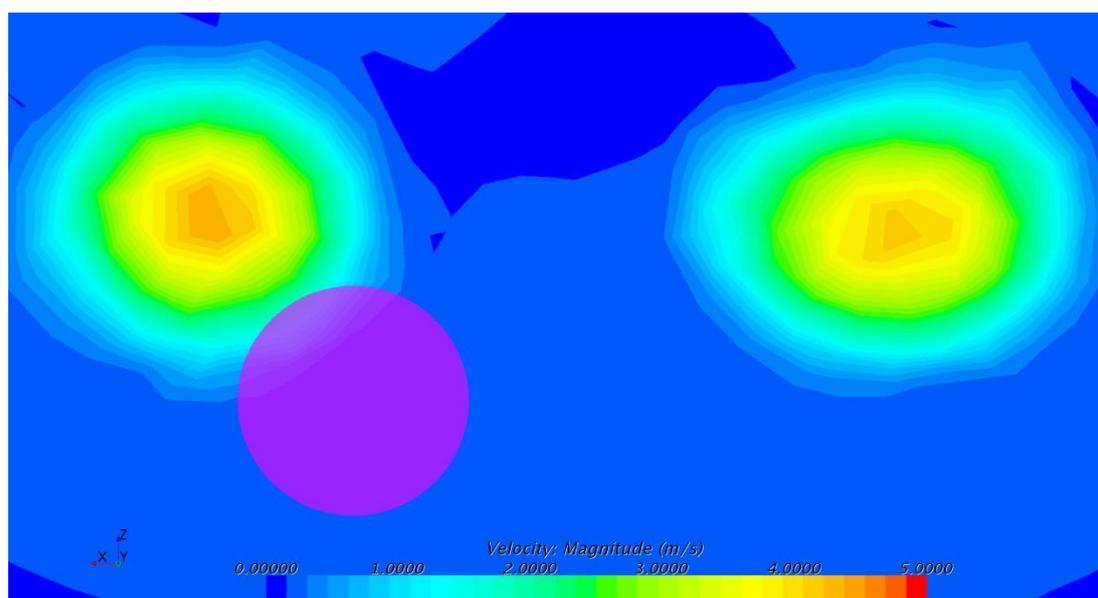


Рис. 5. Поле скоростей в зоне дыхания пассажира справа
Fig. 5. Velocity field in the breathing zone of the passenger on the right

Важно отметить, что с точки зрения комфорта находящихся в кабине, наилучшее расположение соответствует месту водителя – зона дыхания находится между двумя патрубками; это обеспечивает не только постоянный приток воздуха, но и сравнительно невысокую скорость, удовлетворяющую предъявляемым требованиям. Для центрального и правого мест, занимаемых пассажирами, зона дыхания находится близко к центру одного из патрубков и, в зависимости от антропометрических показателей и принятой позы, скорость в реальной области может превышать требуемую даже при обеспечении равномерного расхода по патрубкам. Для более наглядного представления на рис. 6 приведены поля скоростей в области измерения. Полученные значения скорости потока воздуха в зоне дыхания членов экипажа при открытых и закрытых заслонках приведены в табл. 4.

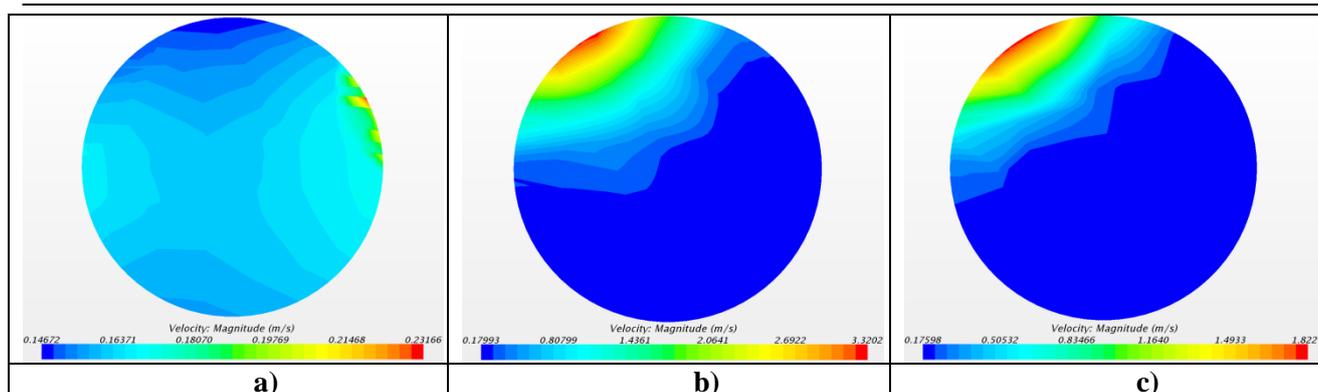


Рис. 6. Поле скоростей области измерения для водителя (а), пассажира в центре (b) и пассажира справа (c)

Fig. 6. Velocity field of the measurement area for the driver (a), passenger in the center (b) and passenger on the right (c)

Таблица 4.

Значения скорости потока воздуха в зоне дыхания

Table 4.

Air flow velocity values in the breathing zone

| Наименование | Заслонки открыты | Заслонки закрыты |
|-------------------|------------------|------------------|
| Водитель | 0,161 м/с | 0,085 м/с |
| Пассажир в центре | 0,474 м/с | 0,095 м/с |
| Пассажир справа | 0,323 м/с | 0,109 м/с |

После внесения изменений в конструкцию была проведена экспериментальная оценка, подтвердившая адекватность и удовлетворительную сходимость разработанной модели и продемонстрировавшая выполнение требований по величине скорости потока воздуха в зоне дыхания.

Выводы

В результате работы усовершенствована конструкция системы кондиционирования кабины перспективной транспортной машины, обеспечено равномерное распределение воздуха по патрубкам, расчетным и экспериментальным путем определены величины скоростей воздуха в зоне дыхания для водителя и пассажиров. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана и верифицирована модель с удовлетворительной степенью достоверности описывающая рассматриваемую систему кондиционирования перспективной транспортной машины.
2. Сформулированы основные подходы по разработке систем кондиционирования, в том числе, на ранних этапах проектирования и с применением методов численного моделирования.
3. Предложены изменения в методику испытаний существующих и перспективных систем кондиционирования, обеспечивающие упрощение проведения и повышение точности получаемого результата.
4. Определены диаметры отверстий для обеспечения равномерного распределение расхода воздуха через каждый патрубок, отклонение не более 5 %. В базовой конструкции данный показатель достигал 173 %.
5. Получены значения скорости потока воздуха для доработанной системы кондиционирования перспективной транспортной машины в зоне дыхания водителя и пассажиров при открытых и закрытых заслонках, удовлетворяющие требованиям (< 1 м/с).

Библиографический список

1. **Трусевич, И.А.** Верификация модальной модели трансмиссии с целью прогнозирования NVH-параметров / И.А. Трусевич, С.В. Абдулов, В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, А.И. Тараторкин, А.А. Волков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 61-68. – DOI: 10.14529/engin210306.
2. **Трусевич, И.А.** Совершенствование акустического поведения корпуса автоматической коробки передач автомобиля категории N2 на основе метода модального представления динамической системы / И.А. Трусевич, И.А. Тараторкин, А.И. Тараторкин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – № 4(65). – С. 38-46. – DOI: 10.46864/1995-0470-2023-4-65-38-46.
3. **Трусевич, И.А.** Прогнозирование виброповедения корпуса перспективной автоматической коробки передач грузового автомобиля на основе метода модального представления динамической системы / И.А. Трусевич, И.А. Тараторкин, А.И. Тараторкин, В.Б. Держанский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 70-81. – DOI: 10.14529/engin240107.
4. **Верещагин, С.Б.** Основы проектирования средств тепловой защиты кабин и обитаемых отсеков / С.Б. Верещагин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – № 3(134). – С. 81-85. – DOI: 10.46960/1816-210X_2021_3_81
5. **Верещагин, С.Б.** Исследование температурного режима и влажности в кабине транспортного средства в условиях жары / С.Б. Верещагин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 3(84). – С. 56-63.
6. **Верещагин, С.Б.** Методология проведения климатических испытаний в кабинах и обитаемых отсеках колёсных и гусеничных машин / С.Б. Верещагин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2020. – № 3 (45). – С. 2-6. – DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-2-6
7. **Верещагин, С.Б.** Натурные ходовые испытания для изучения климатических факторов, воздействующих на водителя в условиях высоких температур / С.Б. Верещагин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – № 2(133). – С. 68-73. – DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_68
8. **Аксенов, П.Ю.** Преимущества и недостатки систем кондиционирования в современных автомобилях / П.Ю. Аксенов, С.З. Манойлина // Молодежный вектор развития аграрной науки. Материалы 71-й студенческой научной конференции. Часть 1. Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I. – 2020. – С. 524-528.
9. **Войтекунас, Р.П.** Развитие систем кондиционирования салона автомобиля / Р.П. Войтекунас, А.П. Ильин // Человек в природном, социальном и социокультурном окружении. Материалы II региональной студенческой научно-практической конференции, посвященной 25-летию Международного Восточно-Европейского университета. – 2018. – С. 98-106.
10. **Маслов, В.А.** Перспективы использования струйных насосов и компрессоров в системах кондиционирования / В.А. Маслов, С.П. Ланин, К.Н. Карасев // Актуальные проблемы научного и технологического обеспечения инновационного развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2024. – С. 45-48.
11. **Шабловский, Я.О.** Оптимизация системы кондиционирования воздуха в салонах автомобилей специального назначения / Я.О. Шабловский, В.В. Киселевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 2. – С. 161-167.
12. **Петров, А.П.** Аспекты компоновок вентиляторных установок систем охлаждения двигателя внутреннего сгорания и кондиционирования воздуха в автомобиле / А.П. Петров, С.Н. Банников // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 12(705). – С. 45-57. – DOI: 10.18698/0536-1044-2018-12-45-57
13. **Ланин, С.П.** Алгоритм управления кондиционером модульного типа / С.П. Ланин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. Том Часть II. – 2021. – С. 55-63.
14. **Ланин, С.П.** Анализ системы управления, регулирования и защиты кондиционера модульного типа / С.П. Ланин, Е.С. Науменко, С.В. Саликов // Структурная модернизация науки как основа устойчивого развития общества. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – 2024. – С. 84-89.
15. **Попов, А.Н.** Исследование эффективности системы управления, регулирования и защиты кондиционера модульного типа / А.Н. Попов, С.П. Ланин, С.В. Саликов // Актуальные проблемы науч-

- ного и технологического обеспечения инновационного развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2024. – С. 58-63.
16. **Пьянзов, С.В.** Анализ средств диагностирования компрессора системы кондиционирования автомобиля / С.В. Пьянзов, П.А. Ионов, А.А. Фиклинов, Р.Ф. Шунихин // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 5(44). С. 48-54. DOI: 10.47581/2022/SMTT/04/Pianzov-Fiklinov.01
 17. **Ионов, П.А.** Анализ факторов, определяющих работоспособность системы кондиционирования транспортно-технологических машин / П.А. Ионов, С.В. Пьянзов, Р.Ф. Шунихин // ОГАРЁВ-ONLINE. Электронное периодическое научное издание. – 2023. – № 5(190). URL: <https://sciup.org/ogarev-online/articles?page=6> (дата обращения 1.08.2025).
 18. **Дубовицкий, О.О.** Применение программного пакета STAR-ССМ+ в решении задач теплопередачи в системе кондиционирования автомобиля / О.О. Дубовицкий, Н.К. Полуянович // Сборник трудов конференции «Информационные технологии, системный анализ и управление» (ИТСАИУ-2015). – 2016. – Т. 3. – С. 197-203.
 19. **Орлов, Е.А.** Анализ напряженно-деформированного состояния участка трубопровода комплексной системы кондиционирования воздуха летательного аппарата / Е.А. Орлов, М.В. Горбачев // Наука и кадры для авиастроения. Труды Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию ФЛА и 75-летию НГТУ. – 2024. – С. 267-271.
 20. **Ко, J.** Status and challenges of vapor compression air conditioning and heat pump systems for electric vehicles / J. Ко, J.H. Jeong, // Applied Energy. – 2024. – Vol. 375. iss. C. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124095
 21. **Xia, K.** PSA-Optimized Compressor Speed Control Strategy of Electric Vehicle / K. Xia, L. Yu, J. Wang, W. Yu // Thermal Management Systems. Energies. – 2025. – Vol. 18, iss. 11. – DOI: 10.3390/en18112687
 22. **Zhu, Z.** Review of integrated thermal management system research for battery electrical vehicles / Z. Zhu, Y. Zhang, A. Chen, J. Chen, Y. Wu, X. Wang, T. Fei // Journal of Energy Storage. – 2025. – Vol. 106. – DOI: 10.1016/j.est.2024.114662
 23. **Jose, S.** Electric Vehicle Air Conditioning System and Its Optimization for Extended Range – A Review / S. Jose, C. Kumar // World Electric Vehicle Journal. – 2022. – Vol. 13, iss. 11. – DOI: 10.3390/wevj13110204
 24. **Zhao, Y.** Simulation Study on Heating Performance of Thermal Management in Heat Pump Air Conditioning Systems for Electric Vehicles / Y. Zhao // International Journal of Automotive Manufacturing and Materials. – 2024. – Vol. 3, iss. 4. – DOI: 10.53941/ijamm.2024.100025
 25. **Shalgar, S.** Waste heat driven hybrid air conditioning system for vehicles / S. Shalgar, R. Bindu // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2469, iss. 1. – DOI: 10.1063/5.0080487
 26. **Schweizer, M.** Influence of heating, air conditioning and vehicle automation on the energy and power demand of electromobility / M. Schweizer, M. Stöckl, R. Tutunaru, U. Holzhammer // Energy Conversion and Management: X. 2023. – Vol. 20. – DOI: 10.1016/j.ecmx.2023.100443
 27. **Tan, L.** Computational fluid dynamics simulation and performance optimization of an electrical vehicle Air-conditioning system / L. Tan, Y. Yuan // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61, iss. 1. – Pp 315-328. DOI: 10.1016/j.aej.2021.05.001
 28. **Niu, J.** Simulation study on the performance of heat pump air conditioning system for pure electric vehicles / J. Niu, Y. Wang, F. Guo // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2782. – DOI: 10.1088/1742-6596/2782/1/012075
 29. **Muriban, J.** Development of an energy-efficient hybrid electric vehicle air-conditioning system test rig coupled with nanolubricant / J. Muriban, R. Mamat, G. S. Prayogo, M. F. Jamlos // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2025. – Vol. 19, no. 1. – Pp. 10530–10543. DOI: 10.15282/jmes.19.1.2025.8.0825
 30. **Chaudhari, S.S.** Optimizing air conditioning efficiency: Utilizing nano-oxides ZnO, CuO, and TiO₂ with traditional and alternative refrigerants in medium temperature range cooling systems / S.S. Chaudhari, A.H. Pundkar, J. Giri, R. Chadge, T. Sathish, A.S. Daryapurkar, A. Pathiban // Interactions. – 2024. – Vol. 245. – DOI: 10.1007/s10751-024-01931-z
 31. **Zawawi, N.N.M.** Experimental investigation of air-conditioning electrical compressor using binary TiO₂-SiO₂ polyol-ester nanolubricants / N.N.M. Zawawi, W.H. Azmi, A.H. Hamisa, Tri Yuni Hendrawati, A.R.M. Aminullah // Case Studies in Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 54. – DOI: 10.1016/j.csite.2024.104045

32. **Di Pierro, G.** Emissions Savings from Efficient Mobile Air-Conditioning (MAC) Systems in Passenger Vehicles / G. Di Pierro, D. Currò, S. Gil-Sayas, G. Fontaras // SAE Technical Paper 2025-01-8156. – 2025. – DOI: 10.4271/2025-01-8156
33. **Rusdijjati, R.** Integration of water heating systems with car air conditioning systems: a bibliometric analysis, lab-scale investigation, and potential applications / R. Rusdijjati, B.C. Purnomo, M.L. Rochman, F.D. Pertiwi, M. Setiyo // Indonesian Journal of Science & Technology. – 2025. – Vol. 10, no. 1. – DOI: 10.17509/ijost.v10i1.80966
34. **Wang, J.** Performance investigation of integrated thermal management system based on a pumped two-phase cooling system for electric vehicles / J. Wang, L. Ruan // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 72. – DOI: 10.1016/j.est.2023.107922
35. **He, L.** Study on a novel thermal management system and heat recovery strategy of range extend electric vehicle / L. He, Z. Gu, Y. Zhang, H. Jing, P. Li // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 237. – DOI: 10.1016/j.renene.2024.121538
36. **Keven, A.** Exergy Analyses of Vehicles Air Conditioning Systems for Different Refrigerants / A. Keven // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. – 2023. – Vol. 9, iss. 1. – Pp. 20-28. DOI: 10.22399/ijcesen.1258770
37. **Yunus, F.A.N.** A Study of the Effect on Air Velocity and Temperature by Altering the Shuttle Bus Parameters / F.A.N. Yunus, Z.A.M. Salleh, M.S.S. Mustafa, H.M. Affandi, A. Kamis, M.B. Rahim // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 107, iss. 1. – Pp. 165-173. – DOI: 10.37934/arfmts.107.1.165173
38. **Baharudin, N.** Examining the Influence of Vehicle Speed on Thermal Comfort and Temperature Control in Vehicle Cabins / N. Baharudin, B. Manshoor, M. Mohamed Salleh, A.N.A. Ahmad, M.A.S. Sabrudin, M. Mondal // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2025. – Vol. 132, no. 1. – Pp. 141–157. DOI: 10.37934/arfmts.132.1.141157
39. **Oztekin, E.K.** Thermoeconomic Analyses of Heat Pumps / E.K. Oztekin, M.M. Gur, R. Karaali // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. – 2025. – Vol. 11, no. 1. – DOI: 10.22399/ijcesen.867
40. **Cai, Z.** Experimental Study on the Cooling Performance of a Hybrid Vehicle Air Conditioning Compressor / Z. Cai, H. Zhao // Scientific Journal of Technology. – 2025. – Vol. 7, no. 2. – Pp. 57-65. – DOI: 10.54691/es2cx156
41. **Morrow, J.A.** Flow condensation heat transfer and pressure drop of R134a alternative refrigerants R513A and R450A in 0.95-mm diameter minichannels / J.A. Morrow, M.M. Derby // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 192. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122894
42. **Zhang, J.** Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of zeotropic mixtures of R134a/R245fa in plate heat exchangers / J. Zhang, B. Elmegaard, F. Haglind // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 164. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120577
43. **Wu, J.** Research on Intelligent Control Technology of Air Conditioning Systems for New Energy Vehicles / J. Wu // Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 119. – Pp. 703-708. – DOI: 10.54097/dbx3ba69
44. **Shalgar, S.** Design and development of a novel multichannel data acquisition system using labview for an automobile air conditioning application / S. Shalgar R. Bindu // Journal of Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 8, iss. 1. – Pp. 14-28. DOI: 10.18186/thermal.1066990
45. **Yakubu, A.U.** Fuzzy-based thermal management control analysis of vehicle air conditioning system / A.U. Yakubu, S. Xiong, Q. Jiang, J. Zhao, Z. Wu, H. Wang, X. Ye, H. Wangsen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 77. – Pp. 834-843. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.030
46. **Zhao, C.** Solutions for decarbonising urban bus transport: a life cycle case study in Saudi Arabia / C. Zhao, L.Z. Kobayashi, A.B.S. Alquaity, J.-C. Monfort, E. Cenker, N. Miralles, S.M. Sarathy // Communications Engineering. – 2024. – DOI: 10.1038/s44172-024-00238-9
47. **Ünal, Ş.** An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions / Ş. Ünal // Journal of Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 3, iss. 1. – Pp. 1089-1101. DOI: 10.18186/thermal.277288
48. **Yunus, F.A.N.** Field Measurement of Air Velocity and Temperature Factors that Influence the Thermal Comfort in Shuttle Bus / F.A.N. Yunus, Z.A.M. Salleh, M.B. Rahim, H.M. Affandi, A. Kamis, M.S.S.

Mustafa // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 101, no. 2. – Pp. 164–171. DOI: 10.37934/arfmts.101.2.164171

49. Çelik, A. Investigation of cabin heating in electric vehicles with integrating solar cells and heat storage systems / A. Çelik // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 101. – DOI: 10.1016/j.est.2024.113782

References

1. Trusevich I.A., Abdulov S.V., Derzhanskiy V.B., Taratorkin I.A., Taratorkin A.I., Volkov A.A. Verifikatsiya modal'noy modeli transmissii s tsel'yu prognozirovaniya NVH-parametrov [Verification of the modal model of the transmission for the purpose of predicting NVH parameters]. Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Mechanical Engineering»]. 2021;21(3):61-68. doi: 10.14529/engin210306 (in Russian).
2. Trusevich I.A., Taratorkin I.A., Taratorkin A.I. Sovershenstvovanie akusticheskogo povedeniya korpusa avtomaticheskoy korobki peredach avtomobilya kategorii N2 na osnove metoda modal'nogo predstavleniya dinamicheskoy sistemy [Improving the acoustic behavior of the automatic transmission housing of an N2 category vehicle based on the modal representation method of a dynamic system]. Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]. 2023;(4):38-46. doi: 10.46864/1995-0470-2023-4-65-38-46 (in Russian).
3. Trusevich I.A., Taratorkin I.A., Taratorkin A.I., Derzhanskiy V.B. Prognozirovanie vibropovedeniya korpusa perspektivnoy avtomaticheskoy korobki peredach gruzovogo avtomobilya na osnove metoda modal'nogo predstavleniya dinamicheskoy sistemy [Predicting the vibration behavior of the housing of an advanced automatic transmission for a truck based on the modal representation method of a dynamic system]. Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Mechanical Engineering»]. 2024;24(1):70-81. doi: 10.14529/engin240107 (in Russian).
4. Vereshchagin S.B. Osnovy proektirovaniya sredstv teplovoy zashchity kabin i obitaemykh otsekov [Fundamentals of designing thermal protection means for cabs and habitable compartments]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2021;(3):81-85. doi: 10.46960/1816-210X_2021_3_81 (in Russian).
5. Vereshchagin S.B. Issledovanie temperaturnogo rezhima i vlazhnosti v kabine transportnogo sredstva v usloviyakh zhary [Study of temperature and humidity conditions in a vehicle cab in hot climates]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie» [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Mechanical Engineering"]. 2011;(3):56-63 (in Russian).
6. Vereshchagin S.B. Metodologiya provedeniya klimaticheskikh ispytaniy v kabinakh i obitaemykh otsekakh kolesnykh i gusenichnykh mashin [Methodology for conducting climatic tests in cabs and habitable compartments of wheeled and tracked vehicles]. Izvestiya MGTU «MAMI» [Izvestiya MGTU «MAMI»]. 2020;(3):2-6. doi: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-2-6 (in Russian).
7. Vereshchagin S.B. Naturnye khodovye ispytaniya dlya izucheniya klimaticheskikh faktorov, vozdeystvuyushchikh na voditelya v usloviyakh vysokikh temperatur [Full-scale road tests to study climatic factors affecting the driver under high temperature conditions]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2021;(2):68-73. doi: 10.46960/1816-210X_2021_2_68 (in Russian).
8. Aksenov P.Yu., Manoylina S.Z. Preimushchestva i nedostatki sistem konditsionirovaniya v sovremennykh avtomobilyakh [Advantages and disadvantages of air conditioning systems in modern cars]. In: Molodezhnyy vektor razvitiya agrarnoy nauki. Materialy 71-y studencheskoy nauchnoy konferentsii. Chast' 1 [Youth vector of development of agricultural science. Proceedings of the 71st Student Scientific Conference. Part 1]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University; 2020. p. 524-528 (in Russian).
9. Voytekunas R.P., Ilyin A.P. Razvitie sistem konditsionirovaniya salona avtomobilya [Development of automotive cabin air conditioning systems]. In: Chelovek v prirodnom, sotsial'nom i sotsiokul'turnom okruzenii. Materialy II regional'noy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 25-letiyu Mezhdunarodnogo Vostochno-Evropeyskogo universiteta [Man in the natural, social and socio-cultural environment. Proceedings of the II Regional Student Scientific and Practical Conference dedicated to the 25th anniversary of the International East European University]. 2018. p. 98-106 (in Russian).
10. Maslov V.A., Lanin S.P., Karasev K.N. Perspektivy ispol'zovaniya struynykh nasosov i kompressorov v sistemakh konditsionirovaniya [Prospects for the use of jet pumps and compressors in air conditioning

- systems]. In: Aktual'nye problemy nauchnogo i tekhnologicheskogo obespecheniya innovatsionnogo razvitiya. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current problems of scientific and technological support for innovative development. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. 2024. p. 45-48 (in Russian).
11. Shablovskiy Ya.O., Kiselevich V.V. Optimizatsiya sistemy konditsionirovaniya vozdukha v salonakh avtomobiley spetsial'nogo naznacheniya [Optimization of the air conditioning system in the cabins of special purpose vehicles]. Chrezvychaynye situatsii: obrazovanie i nauka [Emergency Situations: Education and Science]. 2013;8(2):161-167 (in Russian).
 12. Petrov A.P., Bannikov S.N. Aspekty komponovok ventilyatornykh ustanovok sistem okhlazhdeniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya i konditsionirovaniya vozdukha v avtomobile [Layout aspects of fan units for internal combustion engine cooling and air conditioning systems in a vehicle]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]. 2018;(12):45-57. doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-45-57 (in Russian).
 13. Lanin S.P. Algoritm upravleniya konditsionerom modul'nogo tipa [Control algorithm for a modular-type air conditioner]. In: Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tom Chast' II [Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific and practical conference. Volume Part II]. 2021. p. 55-63 (in Russian).
 14. Lanin S.P., Naumenko E.S., Salikov S.V. Analiz sistemy upravleniya, regulirovaniya i zashchity konditsionera modul'nogo tipa [Analysis of the control, regulation and protection system of a modular-type air conditioner]. In: Strukturnaya modernizatsiya nauki kak osnova ustoychivogo razvitiya obshchestva. Sbornik statey po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Structural modernization of science as a basis for sustainable development of society. Collection of articles following the International Scientific and Practical Conference]. 2024. p. 84-89 (in Russian).
 15. Popov A.N., Lanin S.P., Salikov S.V. Issledovanie effektivnosti sistemy upravleniya, regulirovaniya i zashchity konditsionera modul'nogo tipa [Study of the efficiency of the control, regulation and protection system of a modular-type air conditioner]. In: Aktual'nye problemy nauchnogo i tekhnologicheskogo obespecheniya innovatsionnogo razvitiya. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current problems of scientific and technological support for innovative development. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. 2024. p. 58-63 (in Russian).
 16. P'yanzov S.V., Ionov P.A., Fiklinov A.A., Shunikhin R.F. Analiz sredstv diagnostirovaniya kompressora sistemy konditsionirovaniya avtomobilya [Analysis of diagnostic tools for the automotive air conditioning system compressor]. Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii [Modern Materials, Machinery and Technologies]. 2022;(5):48-54. doi: 10.47581/2022/SMTT/04/Pianzov-Fiklinov.01 (in Russian).
 17. Ionov P.A., P'yanzov S.V., Shunikhin R.F. Analiz faktorov, opredelyayushchikh rabotosposobnost' sistemy konditsionirovaniya transportno-tekhnologicheskikh mashin [Analysis of factors determining the performance of the air conditioning system of transport and technological machines]. OGAREV-ONLINE. 2023;(5). Available from: <https://sciup.org/ogarev-online/articles?page=> [accessed 2025 Aug 1] (in Russian).
 18. Dubovitskiy O.O., Poluyanovich N.K. Primenenie programmnoy paketa STAR-CCM+ v reshenii zadach teploperenosa v sisteme konditsionirovaniya avtomobilya [Application of the STAR-CCM+ software package in solving heat transfer problems in an automobile air conditioning system]. In: Sbornik trudov konferentsii «Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie» (ITSAIU-2015) [Proceedings of the conference «Information Technologies, System Analysis and Management» (ITSAIU-2015)]. 2016. Vol. 3. p. 197-203 (in Russian).
 19. Orlov E.A., Gorbachev M.V. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uchastka truboprovoda kompleksnoy sistemy konditsionirovaniya vozdukha letatel'nogo apparata [Analysis of the stress-strain state of a pipeline section of an aircraft integrated air conditioning system]. In: Nauka i kadry dlya aviastroeniya. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 65-letiyu FLA i 75-letiyu NGTU [Science and personnel for aircraft manufacturing. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of the FLA and the 75th anniversary of NSTU]. 2024. p. 267-271 (in Russian).
 20. Ko J., Jeong J.H. Status and challenges of vapor compression air conditioning and heat pump systems for electric vehicles. Applied Energy. 2024;375(124095). doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124095
 21. Xia K., Yu L., Wang J., Yu W. PSA-Optimized Compressor Speed Control Strategy of Electric Vehicle Thermal Management Systems. Energies. 2025;18(11). doi: 10.3390/en18112687.

22. Zhu Z., Zhang Y., Chen A., Chen J., Wu Y., Wang X., et al. Review of integrated thermal management system research for battery electrical vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2025;106. doi: 10.1016/j.est.2024.114662.
23. Jose S., Kumar C. Electric Vehicle Air Conditioning System and Its Optimization for Extended Range -- A Review. *World Electric Vehicle Journal*. 2022;13(11). doi: 10.3390/wevj13110204
24. Zhao Y. Simulation Study on Heating Performance of Thermal Management in Heat Pump Air Conditioning Systems for Electric Vehicles. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*. 2024;3(4). doi: 10.53941/ijamm.2024.100025.
25. Shalgar S., Bindu R. Waste heat driven hybrid air conditioning system for vehicles. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2469(1). doi: 10.1063/5.0080487.
26. Schweizer M., Stöckl M., Tutunaru R., Holzhammer U. Influence of heating, air conditioning and vehicle automation on the energy and power demand of electromobility. *Energy Conversion and Management*: X. 2023;20. doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100443
27. Tan L., Yuan Y. Computational fluid dynamics simulation and performance optimization of an electrical vehicle Air-conditioning system. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(1):315-328. doi: 10.1016/j.aej.2021.05.001.
28. Niu J., Wang Y., Guo F. Simulation study on the performance of heat pump air conditioning system for pure electric vehicles. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024;2782. doi: 10.1088/1742-6596/2782/1/012075.
29. Muriban J., Mamat R., Prayogo G.S., Jamlos M.F. Development of an energy-efficient hybrid electric vehicle air-conditioning system test rig coupled with nanolubricant. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2025;19(1):10530-10543. doi: 10.15282/jmes.19.1.2025.8.0825.
30. Chaudhari S.S., Pundkar A.H., Giri J., Chadge R., Sathish T., Daryapurkar A.S., et al. Optimizing air conditioning efficiency: Utilizing nano-oxides ZnO, CuO, and TiO₂ with traditional and alternative refrigerants in medium temperature range cooling systems. *Interactions*. 2024;245. doi: 10.1007/s10751-024-01931-z.
31. Zawawi N.N.M., Azmi W.H., Hamisa A.H., Hendrawati T.Y., Aminullah A.R.M. Experimental investigation of air-conditioning electrical compressor using binary TiO₂--SiO₂ polyol-ester nanolubricants. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;54. doi: 10.1016/j.csite.2024.104045.
32. Di Pierro G., Currò D., Gil-Sayas S., Fontaras G. Emissions Savings from Efficient Mobile Air-Conditioning (MAC) Systems in Passenger Vehicles. *SAE Technical Paper 2025-01-8156*. 2025. doi: 10.4271/2025-01-8156.
33. Rusdijati R., Purnomo B.C., Rochman M.L., Pertiwi F.D., Setiyo M. Integration of water heating systems with car air conditioning systems: a bibliometric analysis, lab-scale investigation, and potential applications. *Indonesian Journal of Science & Technology*. 2025;10(1). doi: 10.17509/ijost.v10i1.80966
34. Wang J., Ruan L. Performance investigation of integrated thermal management system based on a pumped two-phase cooling system for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2023;72. doi: 10.1016/j.est.2023.107922.
35. He L., Gu Z., Zhang Y., Jing H., Li P. Study on a novel thermal management system and heat recovery strategy of range extend electric vehicle. *Renewable Energy*. 2024;237. doi: 10.1016/j.renene.2024.121538
36. Keven A. Exergy Analyses of Vehicles Air Conditioning Systems for Different Refrigerants. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2023;9(1):20-28. doi: 10.22399/ijcesen.1258770.
37. Yunus F.A.N., Salleh Z.A.M., Mustafa M.S.S., Affandi H.M., Kamis A., Rahim M.B. A Study of the Effect on Air Velocity and Temperature by Altering the Shuttle Bus Parameters. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2023;107(1):165-173. doi: 10.37934/arfmts.107.1.165173.
38. Baharudin N., Manshoor B., Mohamed Salleh M., Ahmad A.N.A., Sabrudin M.A.S., Mondal M. Examining the Influence of Vehicle Speed on Thermal Comfort and Temperature Control in Vehicle Cabins. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2025;132(1):141-157. doi: 10.37934/arfmts.132.1.141157.
39. Oztekin E.K., Gur M.M., Karaali R. Thermoeconomic Analyses of Heat Pumps. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2025;11(1). doi: 10.22399/ijcesen.867
40. Cai Z., Zhao H. Experimental Study on the Cooling Performance of a Hybrid Vehicle Air Conditioning Compressor. *Scientific Journal of Technology*. 2025;7(2):57-65. doi: 10.54691/es2cx156

41. Morrow J.A., Derby M.M. Flow condensation heat transfer and pressure drop of R134a alternative refrigerants R513A and R450A in 0.95-mm diameter minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022;192. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122894.
42. Zhang J., Elmegaard B., Haglind F. Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of zeotropic mixtures of R134a/R245fa in plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;164. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120577.
43. Wu J. Research on Intelligent Control Technology of Air Conditioning Systems for New Energy Vehicles. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024;119:703-708. doi: 10.54097/dbx3ba69.
44. Shalgar S., Bindu R. Design and development of a novel multichannel data acquisition system using labview for an automobile air conditioning application. *Journal of Thermal Engineering*. 2022;8(1):14-28. doi: 10.18186/thermal.1066990.
45. Yakubu A.U., Xiong S., Jiang Q., Zhao J., Wu Z., Wang H., et al. Fuzzy-based thermal management control analysis of vehicle air conditioning system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;77:834-843. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.030
46. Zhao C., Kobayashi L.Z., Alqaity A.B.S., Monfort J.-C., Cenker E., Miralles N., et al. Solutions for decarbonising urban bus transport: a life cycle case study in Saudi Arabia. *Communications Engineering*. 2024. doi: 10.1038/s44172-024-00238-9.
47. Ünal Ş. An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions. *Journal of Thermal Engineering*. 2016;3(1):1089-1101. doi: 10.18186/thermal.277288.
48. Yunus F.A.N., Salleh Z.A.M., Rahim M.B., Affandi H.M., Kamis A., Mustafa M.S.S. Field Measurement of Air Velocity and Temperature Factors that Influence the Thermal Comfort in Shuttle Bus. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2023;101(2):164-171. doi: 10.37934/arfmts.101.2.164171.
49. Çelik A. Investigation of cabin heating in electric vehicles with integrating solar cells and heat storage systems. *Journal of Energy Storage*. 2024;101. doi: 10.1016/j.est.2024.113782.

**Дата поступления
в редакцию: 18.08.2025**

**Дата принятия
к публикации: 15.01.2026**