
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Научная статья

УДК 656.13

DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-164-182

EDN: OASCWV



**ИСПЫТАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ
ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА: СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА
ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ**

Артем Александрович Ковешников¹

Полина Вадимовна Малыхина^{2✉}

Николай Юрьевич Торопов³

Владислав Владимирович Феофанов⁴

^{1,2,3,4} Российский дорожный научно-исследовательский институт
(ФАУ «РОСДОРНИИ»), Москва, Россия

¹KoveshnikovAA@rosdornii.ru

²malykhinapv@rosdornii.ru✉

³toropov@rosdornii.ru

⁴FeofanovVV@rosdornii.ru

Аннотация: В статье рассматривается повышение точности метода оценки параметра «средняя скорость движения транспортных средств» при проведении испытаний подсистемы мониторинга параметров транспортного потока (ПМПТП) в составе интеллектуальной транспортной системы. Актуальность работы обусловлена тем, что достоверность верификации средней скорости определяется не только точностью измерительного канала ПМПТП, но и методической погрешностью контрольных измерений, связанной с выбором опорного средства измерений, пространственно-временной сопоставимостью зон детекции и корректной статистической обработкой результатов. На основе результатов ранее выполненных испытаний на пилотной зоне ИТС, где при визуальной оценке скорости получены расхождения, превышающие нормативный порог, разработан уточненный подход к испытаниям скорости. В технологическом проекте формализованы

требования к совпадению зоны радиолокационной детекции детектора транспорта и зоны фиксации скорости контрольного средства, а также установлен метод обработки и валидации результатов многократных измерений с контролем выбросов. Натурные испытания проведены на участке пилотной зоны ИТС в Республике Татарстан с использованием детектора транспорта ПМПТП и комплекса фото-видеофиксации «Азимут-4» в качестве опорного средства. По данным протоколов, собранных в течение 120 минут с интервалом 10 минут по двум направлениям, выполнена обработка и статистическая оценка погрешности. Показано, что предложенный метод обеспечивает выполнение критерия приемки по средней скорости (не более $\pm 5\%$ относительно опорных значений) и повышает воспроизводимость испытаний за счет снижения методической составляющей погрешности контрольного метода.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, мониторинг транспортного потока, средняя скорость движения, программа и методика испытаний, валидация результатов измерений.

Для цитирования: Ковешников А.А., Малыхина П.В., Торопов Н.Ю., Феофанов В.В. Испытания подсистемы мониторинга параметров транспортного потока: совершенствование метода оценки средней скорости // Дороги и мосты. 2026. № 55/1. С. 164-182. DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-164-182.

INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS

Original article

TESTING THE TRAFFIC FLOW MONITORING SUBSYSTEM: IMPROVING THE METHOD OF ESTIMATING AVERAGE SPEED

Artem A. Kovesnikov¹

Polina V. Malykhina²✉

Nikolai Y. Toropov³

Vladislav V. Feofanov⁴

^{1,2,3,4} Russian Road Scientific Research Institute (FAI «ROSDORNII»),
Moscow, Russia

¹kovesnikovAA@rosdornii.ru

²malykhinapv@rosdornii.ru✉

³toropov@rosdornii.ru

⁴feofanovVV@rosdornii.ru

Abstract: *This paper addresses improving the accuracy of the «average vehicle speed» verification method during tests of a traffic flow monitoring subsystem (TFMS) within an Intelligent Transportation System (ITS). The problem is driven by the fact that the reliability of average-speed verification depends not only on the TFMS measurement channel, but also on the methodological error of the control measurements. Such error is primarily determined by the selection of a reference instrument, the spatial and temporal matching of detection zones, and correctly statistical processing of the results. Based on the outcomes of previous field tests performed at an ITS pilot site (Republic of Tatarstan), where visual/video-based speed control produced discrepancies exceeding the normative accuracy threshold, an updated testing approach was developed. The technological project formalizes requirements for matching the radar detector's detection zone with the speed fixation zone of the reference device and specifies a processing and validation method for repeated measurements, including outlier detection. Field tests were conducted on the ITS pilot site using the TFMS traffic detector and the certified photo/video speed enforcement system «Azimut-4» as the reference measurement instrument. Using protocol data collected over 120 minutes with 10-minute intervals for two travel directions, office (post-processing) calculations and statistical error assessment were performed. The results demonstrate that the proposed method meets the acceptance criterion for average speed (no more than $\pm 5\%$ relative to the reference values) and improves test repeatability by reducing the methodological component of control-measurement uncertainty.*

Keywords: *intelligent transportation systems, traffic flow monitoring, average speed, test program and methodology, measurement results validation.*

For citation: **Koveshnikov A.A., Malykhina P.V., Toropov N.Y., Feofanov V.V.** Testing the traffic flow monitoring subsystem: improving the method of estimating average speed // Roads and Bridges. – 2026; (55/1): 164-182. (In Russ). DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-164-182.

ВВЕДЕНИЕ

Подсистема мониторинга параметров транспортного потока является одним из основных источников данных для интеллектуальных транспортных систем (ИТС), поскольку данные о параметрах транспортного потока необходимы для оценки дорожной ситуации, принятия решений по управлению транспортными потоками (ТП) и т.д. Параметр «средняя скорость движения транспортных средств» относится к ключевым показателям, используемым для мониторинга состояния транспортного потока, выявления ухудшений условий движения и последующей оценки эффективности мероприятий организации дорожного движения [1]. В подсистемах мониторинга параметров

транспортного потока (ПМПТП) данный показатель формируется автоматически по данным, получаемым от детекторов транспорта, и используется совместно с такими параметрами как «интенсивность движения», «состав транспортного потока», «плотность движения» и иными характеристиками потока.

Особенность испытаний ПМПТП по параметру «Средняя скорость движения транспортных средств» заключается в том, что достоверность оценки зависит не только от точности самой подсистемы, но и от корректности организации контрольных измерений: выбора опорного средства с меньшей погрешностью, пространственно-временной сопоставимости зон детекции, соблюдения условий агрегации данных и применения стандартизированной процедуры статистической обработки результатов [2]. При недостаточной точности контрольного метода суммарная погрешность опорных измерений становится сопоставимой с допустимой погрешностью испытываемой подсистемы, что не позволяет однозначно установить источник расхождения – ошибку ПМПТП или ограничения самого контрольного метода.

По результатам предыдущих испытаний, выполненных авторами на пилотной зоне ИТС в Республике Татарстан, установлено, что применявшийся визуальный метод контроля средней скорости, основанный на фиксации времени прохождения транспортными средствами двух контрольных рубежей при известной базе, характеризовался значительными случайной и систематической погрешностями. Расхождения между данными ПМПТП и результатами визуального контроля составили более 10 %, что превышает установленный нормативный порог точности по данному параметру, ограничивая применимость метода для целей верификации [3].

Данный результат послужил основанием для разработки уточненного метода испытаний, обеспечивающего снижение суммарной погрешности контрольных измерений за счет следующих решений:

- применения контрольного средства измерений с меньшей погрешностью;
- регламентации пространственно-временной сопоставимости измерений;
- стандартизированной обработки результатов многократных измерений.

Целью работы, представленной в данной статье, являлось повышение точности метода оценки параметра «средняя скорость движения транспортных средств» при проведении испытаний ПМПТП за счет замены визуального контрольного метода на сравнительный метод, основанный на данных, полученных от контрольного

оборудования измерения скорости движения транспортного средства (ТС), и данных, полученных от ПМПТП. В качестве основного результата рассматривалась практическая применимость предложенного метода контроля средней скорости для испытаний ПМПТП и доказательное снижение методической погрешности по сравнению с визуальным контролем.

Анализ публикаций по теме измерения и верификации средней скорости

Вопрос оценки средней скорости движения транспортных средств по данным ИТС рассматривается в исследованиях как задача, в которой решающее значение имеет не только точность измерительного канала, но и условия сопоставления результатов. При сравнении данных разных систем наблюдения (радиолокационных датчиков, видеосистем и комбинированных решений) расхождения по скорости могут быть обусловлены методической погрешностью контрольных измерений: различием зон наблюдения, неодинаковым моментом фиксации ТС, различиями в правилах расчета скорости за выбранный интервал времени и особенностями движения на участке. В полевых работах показано, что при высокой плотности потока, многополосности и частичных перекрытиях транспортных средств влияние перечисленных факторов возрастает, а несовпадение зон контроля и интервалов расчета способно формировать устойчивое отклонение результатов, сопоставимое с допускаемым уровнем погрешности показателя средней скорости [4].

В исследованиях по видеосистемам измерения скорости отдельно отмечается зависимость точности от настройки геометрии наблюдения и устойчивости отслеживания транспортных средств. Для сопоставимых оценок предлагаются подходы, в которых значения скорости задаются независимыми измерениями, а результаты анализируются по статистике ошибок на выборке транспортных средств и условий наблюдения [5]. При этом подчеркивается, что для типовых потоков видеонаблюдения пониженного качества возрастает доля ошибочных значений и увеличивается разброс оценок, поэтому при расчете средних значений требуется заранее задавать порядок исключения некорректных результатов и единые правила обработки наблюдений [6].

Для радиолокационных датчиков в исследованиях отмечается зависимость точности оценки параметров движения от конфигурации установки и положения ТС в зоне наблюдения. Показано, что в плотном потоке возможны ошибки сопоставления измерений с конкретными транспортными средствами, а также появление единичных

ошибочных значений, что требует проверки корректности исходных данных и единых подходов к обработке результатов многократных измерений [7, 8]. Подобные выводы представлены и в российских публикациях по оценке скорости и параметров транспортного потока по видеонаблюдению: устойчивость оценки средней скорости определяется условиями съемки, геометрией наблюдения и корректностью отслеживания транспортных средств, а сопоставимость результатов обеспечивается единообразием расчетной процедуры [9, 10].

Таким образом, анализ публикаций показывает, что при испытаниях параметра «средняя скорость движения транспортных средств» требуется обеспечивать сопоставимость зон детекции и контрольной фиксации, согласование измерений по времени и расчет показателя за одинаковые интервалы, а также единый подход к обработке результатов многократных наблюдений, включая контроль выбросов. Указанные положения согласуются с постановкой задачи настоящей работы и обосновывают необходимость уточнения методики испытаний, направленной на снижение методической погрешности контрольных измерений и повышение воспроизводимости результатов сравнения.

Предпосылки исследования

Ранее на пилотной зоне ИТС в Республике Татарстан были проведены определительные испытания ПМПТП [3], по итогам которых экспериментально обоснованы подходы к формированию методики испытаний ПМПТП и оценке точности измерений параметров транспортного потока. В частности, функция статистической обработки результатов измерений в составе ПМПТП рассматривалась через расчет средней скорости транспортных средств, наряду с другими производными показателями. Испытания проводились в фактических зонах детекции детекторов транспорта по двум направлениям движения и в различные периоды суток. Всего было проведено 12 испытаний, результаты которых оформлены в протоколах.

Для верификации параметра «средняя скорость движения транспортных средств» применялся следующий подход – ручная обработка видеофайлов, полученных от подсистемы видеонаблюдения, с вычислением времени прохождения транспортных средств между двумя фиксированными точками при заранее измеренной базе, последующим расчетом средней скорости и сравнением с данными ПМПТП [11].

Однако анализ показал, что применявшийся метод характеризуется высокой суммарной погрешностью: среднее значение относительной погрешности результатов, полученных при ручной

обработке, составило 10,57 %, что превышает нормируемый предел для ПМПТП (± 5 %). Следовательно, точность данного контрольного метода недостаточна для достоверной верификации параметра «средняя скорость движения транспортных средств» ПМПТП.

По результатам анализа в публикации 2024 г. [3] сделан вывод о необходимости повышения точности методики испытаний за счет совершенствования контрольного измерения, в том числе путем применения инструментальных средств и приборов, сертифицированных как средства измерения скорости, с погрешностью меньшей, чем у тестируемой подсистемы (менее 5 %), а также за счет повышения качества исходных данных (разрешение и частота кадров видеозаписи), оптимизации расположения видеокамеры и использования источников точного времени для фиксации моментов пересечения реперных линий. Эти выводы легли в основу корректировки технологического проекта, разработки программы и методики испытаний, а также проведения последующих натурных испытаний по обновленному методу.

Разработка технологического проекта на создание метода исследований и испытаний ПМПТП

Для проведения определительных испытаний, направленных на установление качественных и количественных характеристик подсистемы с заданными показателями точности и достоверности, был разработан Технологический проект (ТП) на создание метода исследований и испытаний «Метод испытаний подсистемы мониторинга параметров транспортных потоков». Реализация проекта была направлена на проверку функциональных возможностей подсистемы, подтверждение соответствия ее параметров установленным требованиям, а также обеспечение единообразия и воспроизводимости процедур испытаний при последующем применении методики в научной и инженерной практике.

Скорость движения транспортных средств определяется как величина, численно равная проходимому транспортным средством пути за единицу времени. Средняя скорость движения транспортных средств определяется как значение, равное сумме всех скоростей транспортных средств, деленной на количество транспортных средств, прошедших через сечение дороги за определенный промежуток времени.

Тестируемой на Пилотной зоне ПМПТП определяется скорость движения транспортных средств с использованием радиоволнового детектора, работающего на основе эффекта Доплера (по изменению частоты отраженного сигнала) [12]. Проверка параметра средней скорости выполнялась путем сравнения значений, полученных от

ПМПТП, с опорными значениями, установленными в ходе контрольных измерений.

В ТП учтены пространственные и внешние факторы, влияющие на результаты измерений в зоне радиолокационной детекции ДТ. Зона детекции определяется конфигурацией установки и параметрами детектора, а также может зависеть от характеристик окружающей среды. Для обеспечения корректности сравнения данных и минимизации случайной составляющей погрешности необходимо, чтобы контрольные измерения выполнялись в зоне, совпадающей с зоной детекции ДТ. В соответствии с этим требованием в качестве контрольного средства измерений было применено сертифицированное оборудование – комплекс фото-видеофиксации «Азимут-4».

Критерием приемки при проверке параметра «средняя скорость транспортных средств» в ТП установлено ограничение на расхождение между данными, полученными от ПМПТП, и данными контрольной проверки: полученные значения не должны отличаться более чем на 5 %.

Проведение испытаний по параметру «средняя скорость транспортного потока»

Для апробации подходов, разработанных в ТП, были проведены натурные испытания ПМПТП по параметру «средняя скорость движения транспортных средств» в условиях реального транспортного потока. На основании методов, разработанных в ТП, была разработана программа и методика испытаний «Тестирование подсистемы мониторинга параметров транспортных потоков» (ПМИ) – документ, регламентирующий состав, последовательность, условия проведения испытаний.

Испытания проводились на участке пилотной зоны ИТС в Республике Татарстан, на территории особой экономической зоны «Алабуга». Для проведения испытаний использовалась инфраструктура базового контура пилотной зоны ИТС, включающая в себя:

- Испытательные сооружения, средства испытания.
- ПМПТП в составе телеметрических микроволновых датчиков дорожного движения TMS.13 T-35/76-83, программного обеспечения «Смартроад», установленного на сервере приложений тип 1.
- Центр управления:
 - серверное оборудование (сервер приложений тип 1);
 - автоматизированное рабочее место.
- Средства измерения (далее – СИ):

- комплекс измерительный программно-технический Азимут 4 (заводской номер 008-25) с установленным программным обеспечением;
 - рулетка измерительная 10 м;
 - станция автоматическая дорожная метеорологическая «Иней» (далее – АДМС);
 - курвиметр.
- Дополнительное оборудование.

Для испытаний был выбран один из установленных ДТ – 2 (Место размещения – ДКШ № 58, опора № 19). ПМИ фиксирует базовые параметры установки детектора и геометрию зон детекции для прямого и обратного направлений движения. В **табл. 1** представлены параметры установки проверяемого ДТ.

Таблица 1

*Параметры установки ДТ**

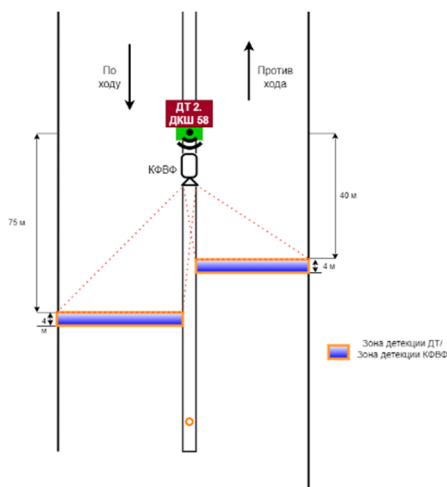
<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Выбранный детектор транспорта	ДТ 2 (ДКШ № 58, опора № 19)
Высота установки, м	6
Зенитный угол, °	2
Азимутальный угол, °	1,5
Прямое направление: удаление до начала зоны детекции от 0-точки, м	75
Прямое направление: длина зоны детекции, м	4
Обратное направление: удаление до начала зоны детекции от 0-точки, м	40
Обратное направление: длина зоны детекции, м	4

*Примечание: * составлено авторами.*

В качестве опорного (контрольного) средства измерений был выбран комплекс фото-видеофиксации «Азимут-4» (далее – КФВФ). Согласно паспортным данным, КФВФ обеспечивает измерение скорости транспортных средств в диапазоне от 0 до 350 км/ч с допускаемой абсолютной погрешностью не более ± 1 км/ч при измерении по видеокадрам и ± 1 % при скоростях свыше 100 км/ч. Учитывая, что погрешность измерений КФВФ существенно ниже предела погрешности радиоволновых детекторов транспорта (± 5 %), данные, получаемые от КФВФ, принимаются в качестве опорных значений при проведении испытаний ПМПТП.

На **рис. 1** приведена схема расположения ДТ, КФВФ, а также размечены зоны детекции по прямому и обратному направлениям.

Рис. 1. Схема зоны детекции ДТ и зоны фиксации скорости контрольного средства
(составлено авторами)



В **табл. 2** приведены характеристики средств измерений, используемые при проведении испытаний по параметру «средняя скорость».

Таблица 2

Средства измерений и характеристики, используемые при проверке средней скорости (по отчету и ПМИ)

Средство измерений	Назначение в испытаниях	Ключевые характеристики, влияющие на проверку средней скорости
Детектор транспорта (ДТ) в составе ПМПТП	Формирование средней скорости средствами ПМПТП (измерительный канал подсистемы)	Принцип измерения скорости: радиолокационный (эффект Доплера); точность измерения скорости (принята в отчете): 5 %
КФВФ «Азимут 4» (зав. № 008-25)	Получение опорных значений скорости (контрольное средство измерений)	Точность измерения скорости: 1 км/ч (0-100 км/ч) и 1 % (100-350 км/ч); используется как опорное средство

Важным организационно-методическим условием является настройка КФВФ таким образом, чтобы зона фиксации скорости совпадала с зоной радиолокационной детекции ДТ. Несоблюдение данного условия приводит к возникновению систематического смещения, обусловленного сравнением значений, сформированных по

различным выборкам транспортных средств. Настройка зоны фиксации КФВФ выполнена в соответствии с технической документацией и требованиями разработанной ПМИ. Зона фиксации КФВФ настраивалась перед началом проведения испытаний.

Сбор исходных данных осуществлялся на протяжении 120 минут с фиксацией результатов каждые 10 минут по двум направлениям движения. По каждому 10-минутному интервалу регистрировались:

- интенсивность движения и средняя скорость по КФВФ;
- интенсивность движения и средняя скорость по ДТ.

Выбор периода времени в 120 минут обусловлен тем, что, согласно нормативным документам, погрешность измерения скорости ТС не должна превышать 10 % в течение 60-минутного интервала, но для большей выборки было сформировано 2 выборки по 60 минут каждая. Для более детального сопоставления данных, получаемых от ПМПТП и контрольного средства измерений, с учетом различий в алгоритмах их обработки и принципиальным различием обработки данных внутри каждой из систем, каждый 60-минутный интервал был разделен на 10-минутный.

Поскольку значение средней скорости транспортного потока, рассчитываемое ПМПТП, определяется автоматически как среднее арифметическое скоростей транспортных средств за установленный временной интервал агрегирования, тогда как КФВФ регистрирует мгновенную скорость каждого отдельного ТС, для обеспечения методологической сопоставимости результатов была выполнена предварительная обработка контрольных данных. В частности, средняя скорость транспортного потока по данным КФВФ рассчитывалась как среднее арифметическое мгновенных скоростей отдельных транспортных средств, зарегистрированных в пределах того же временного интервала, что использовался ПМПТП.

Полученные в результате сбора данных значения представлены в табл. 3, 4.

Метод обработки и валидации результатов измерения параметра «средняя скорость транспортных средств»

Целью обработки результатов являлось подтверждение соответствия значений средней скорости, сформированных ПМПТП, пределу погрешности $\pm 5\%$ относительно опорных значений, полученных от КФВФ. Оцениваемой величиной является относительная погрешность результатов прямых измерений ПМПТП по отношению к контрольному средству измерения скорости.

Таблица 3

Результаты испытаний по определению средней скорости транспортного потока (обратное направление)

№	Интервал, мин	Интенсивность КФВФ, авт.	Средняя скорость КФВФ, км/ч	Интенсивность ДТ, авт.	Средняя скорость ДТ, км/ч
1	9.50-10.00	47	62,78	49	60,39
2	10.00-10.10	51	63,30	52	60,97
3	10.10-10.20	64	66,19	62	63,73
4	10.20-10.30	58	64,29	57	62,97
5	10.30-10.40	58	62,46	59	60,9
6	10.40-10.50	48	66,00	49	63,47
Итого		326	64,17	328	62,07
1	10.50-11.00	69	65,08	74	64,39
2	11.00-11.10	64	64,31	65	61,97
3	11.10-11.20	65	65,74	66	64,21
4	11.20-11.30	80	66,84	83	64,96
5	11.30-11.40	75	69,81	78	67,58
6	11.40-11.50	84	62,67	88	61,36
Итого		437	65,74	454	64,08

Таблица 4

Результаты испытаний по определению средней скорости транспортного потока (прямое направление)

№	Интервал, мин	Интенсивность КФВФ, авт.	Средняя скорость КФВФ, км/ч	Интенсивность ДТ, авт.	Средняя скорость ДТ, км/ч
1	9.50-10.00	112	61,88	125	62,16
2	10.00-10.10	105	61,18	110	61,05
3	10.10-10.20	85	58,77	94	57,45
4	10.20-10.30	78	61,03	84	60,48
5	10.30-10.40	90	59,29	96	58,91
6	10.40-10.50	92	62,22	92	61,88
Итого		562	60,73	601	60,32
1	10.50-11.00	77	59,13	85	59,26
2	11.00-11.10	93	61,67	106	61,57
3	11.10-11.20	85	61,69	92	61,16
4	11.20-11.30	96	62,73	99	62,11
5	11.30-11.40	77	57,56	82	57,45
6	11.40-11.50	91	60,58	97	60,46
Итого		519	60,56	561	60,34

Обработка результатов выполнялась в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [13] как обработка результатов многократных измерений с расчетом погрешностей оценки измеряемой величины и с контролем выбросов. В качестве опорного (условно истинного) значения измеряемой величины принимались данные КФВФ.

Для количественной оценки точности измерений в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 необходимо определить абсолютную и относительную погрешности (относительная погрешность принимается за измеряемую величину).

Согласно ГОСТ 34100.3-2017 / ISO/ IEC Guide 98-3:2008 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения», данные показатели определяются следующим образом:

Абсолютная погрешность – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины:

$$\Delta = x_i - x_0 , \quad (1)$$

где

x_i – значение, полученное от проверяемого средства измерений;
 x_0 – значение, полученное от эталонного средства измерений.

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta_i = \frac{x_i - x_0}{x_0} * 100 \% . \quad (2)$$

После определения относительной погрешности, выступающей в качестве измеряемой величины, выполняются расчеты согласно ГОСТ Р 8.736-2011 (пп. 5-7).

Далее была принята адаптация алгоритма для параметра скорости движения: в качестве результата прямого измерения рассматривается значение средней скорости, полученное от ПМПТП, а в качестве опорного значения – значение средней скорости, установленное по контрольному средству.

Таким образом, соответствующее выражение для относительной погрешности приведено в ТП (3):

$$\delta_i = \frac{V_{ni} - V_{ki}}{V_{ki}} * 100 \% , \quad (3)$$

где

V_{ni} – i-е значение средней скорости транспортных средств, определенное ПМПТП, км/ч;

V_{ki} – i-е значение средней скорости транспортных средств, определенное по данным контрольного средства измерений (КФВФ);

Среднее значение относительной погрешности:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i , \quad (4)$$

где

δ_i – относительная погрешность измерения средней скорости в i -м интервале наблюдений, %;
 n – количество измерений.

Среднее квадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}, \quad (5)$$

где

$\bar{\delta}$ – среднее значение относительной погрешности измерения средней скорости в i -м интервале наблюдений, %;
 δ_i – относительная погрешность измерения средней скорости в i -м интервале наблюдений, %;
 n – количество измерений.

Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{\delta}} = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

где

S – среднеквадратическое отклонение относительной погрешности, %;
 n – количество измерений.

Критерий Граббса (для выявления выбросов):

$$G_1 = \frac{|\delta_{max} - \bar{\delta}|}{S}, \quad G_2 = \frac{|\bar{\delta} - \delta_{min}|}{S}, \quad (7)$$

где

δ_{max} – наибольший результат относительной погрешности измерения средней скорости в выборке, %;
 δ_{min} – наименьший результат относительной погрешности измерения средней скорости в выборке, %;
 S – среднеквадратическое отклонение относительной погрешности, %.

Если $G_1 > G_T$ или $G_2 > G_T$ (где G_T – критическое значение по ГОСТ Р 8.736–2011), соответствующее значение исключается из выборки.

Доверительные границы случайной погрешности.

Коэффициент t выбирается в соответствии с таблицами коэффициента Стьюдента для принятой доверительной вероятности и числа степеней свободы (ГОСТ Р 8.736-2011 [13]):

$$\varepsilon = t * S_{\bar{\delta}}, \quad (8)$$

где

t – коэффициент Стьюдента для выбранной доверительной вероятности и числа степеней свободы;

$S_{\bar{\delta}}$ – среднеквадратическое отклонение среднего значения относительной погрешности, %.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных осуществляется оценка соответствия результатов измерения средней скорости установленным требованиям. Оценка проводится путем сопоставления доверительных границ случайной составляющей относительной погрешности, определённых по результатам выборки многократных измерений, с пределами допускаемой погрешности, заявленными производителем и установленными нормативной документацией.

Обработка и анализ результатов испытаний

Обработка результатов измерений включала:

- расчет δ_i для каждого 10-минутного интервала;
- статистическую обработку выборки;
- контроль выбросов по критерию Граббса;
- определение доверительных границ.

Итоговые показатели обработки и валидации результатов представлены в **табл. 5**.

Таблица 5

Итоговые показатели обработки и валидации результатов по параметру «средняя скорость»

Направление	n	$\bar{\delta}$, %	S , %	$\varepsilon (P = 0,95)$, %	Примечание
Обратное	12	-2,89	0,89	$\pm 0,57$	Выбросов нет (критерий Граббса)
Прямое	12	-0,52	0,70	$\pm 0,46$	Обнаружен выброс $\delta = -2,25$ (критерий Граббса)
Прямое (скорр.)	11	-0,37	0,44	$\pm 0,29$	После исключения выброса

По результатам обработки установлено, что для обратного направления среднее значение относительной погрешности составляет $\bar{\delta} = -2,89$ % при доверительных границах $\varepsilon = \pm 0,57$ %. Для прямого направления первоначально получено $\bar{\delta} = -0,52$ % ($\varepsilon = \pm 0,46$ %), при этом по критерию Граббса [14] выявлено выбросное значение $\delta = -2,25$ %; после исключения выброса среднее значение составило $\bar{\delta} = -0,37$ % при доверительных границах $\varepsilon = \pm 0,29$ %.

Полученные результаты удовлетворяют критерию приемки, установленному ТП и ПМИ: расхождение между значениями средней скорости по ПМПТП и контрольным измерениям не превышает 5 %.

Наличие устойчивого отрицательного смещения (знак δ) следует учитывать при интерпретации результатов и при последующих настройках измерительного канала; однако в рамках настоящей работы фиксируется факт выполнения критерия приемки и применимость уточненного метода проверки для испытаний ПМПТП.

Следует отметить наличие расхождений в значениях интенсивности транспортного потока, полученных по данным КФВФ и детектора транспорта. Данное различие обусловлено особенностями принципов работы указанных средств измерений и алгоритмов обработки данных.

КФВФ осуществляет индивидуальную фиксацию каждого ТС в зоне контроля, тогда как радиоволновой детектор формирует данные на основе анализа отраженного сигнала в зоне детекции, в пределах которой одновременно могут находиться несколько транспортных средств. В условиях плотного потока это может приводить к объединению близко расположенных объектов или, напротив, к кратковременной потере отдельных целей. Дополнительное влияние оказывают различия в геометрии зон наблюдения и алгоритмах агрегации данных, что приводит к систематическим расхождениям в оценке интенсивности. При этом указанные различия не оказывают существенного влияния на сопоставление средней скорости, поскольку анализ выполняется по агрегированным значениям за одинаковые временные интервалы.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование подтвердило гипотезу о возможности принципиального повышения точности оценки параметра «средняя скорость движения транспортных средств» при испытаниях ПМПТП. Достигнутый результат обеспечен переходом от визуального контроля к объективному сравнительному методу, основанному на прямом сопоставлении данных ПМПТП с эталонными показаниями контрольного измерительного оборудования. Ключевыми выводами, обосновывающими эффективность предложенного подхода, являются:

1) Разработанная методика проверки параметра «средняя скорость движения транспортных средств» обеспечивает метрологически корректное сопоставление данных ПМПТП с опорными значениями, полученными от контрольного средства измерений, при условии пространственного совпадения зон детекции.

2) Предложенный алгоритм обработки результатов испытаний позволяет обрабатывать данные многократных измерений: рассчитывать статистические оценки погрешности, выявлять и исключать

выбросы по критерию Граббса, а также определять доверительные границы случайной погрешности, что повышает обоснованность и воспроизводимость выводов.

3) По результатам натуральных испытаний подтверждено выполнение критерия приемки $\pm 5\%$: средние относительные погрешности составили $-2,89\%$ (обратное направление) и $-0,37\%$ (прямое направление, после исключения выброса). Полученные данные подтверждают практическую применимость уточненного метода для верификации ПМПТП в составе интеллектуальных транспортных систем.

Таким образом, исследование достигает своей основной цели: разработанный и апробированный сравнительный метод верификации средней скорости представляет собой готовое, метрологически обоснованное решение для проведения натуральных испытаний ПМПТП.

© Ковешников А.А., Малыхина П.В., Торопов Н.Ю., Феофанов В.В., 2026

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов А.А. Теория транспортных потоков: монография. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 124 с.
2. *Khutornoi I. Estimation of optical speed measurement error for traffic monitoring systems // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 244. – 08023. – DOI: 10.1051/e3sconf/202124408023.*
3. Экспериментальное обоснование подходов к формированию методики испытаний подсистемы мониторинга параметров транспортного потока / А.А. Свистельников, А.А. Ковешников, П.В. Малыхина [и др.] // *Дороги и мосты. – 2024. – № 2(52). – С. 287-305. – EDN: INRTEG.*
4. *Gribbon A.P. Field test of nonintrusive traffic detection technologies // Mathematical and Computer Modelling. – 1998. – Vol. 27, Issues 9-11. – P. 349-352. – DOI: 10.1016/S0895-7177(98)00069-7.*
5. *Sochor J., Juranek R., Spanhel J., Marsik L., Siroky A., Herout A., Zemcik P. Comprehensive Data Set for Automatic Single Camera Visual Speed Measurement // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2019. – Vol. 20, No. 5. – P. 1633-1643. – DOI: 10.1109/TITS.2018.2825609.*
6. *Revaud J., Humenberger M. Robust Automatic Monocular Vehicle Speed Estimation for Traffic Surveillance // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2021. – P. 4531-4541. – DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00451.*
7. *Zhao C., Ding D., Du Z., Shi Y., Su G., Yu S. Analysis of Perception Accuracy of Roadside Millimeter-Wave Radar for Traffic Risk Assessment and Early Warning Systems // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2023. – Vol. 20, No. 1. – Art. 879. – DOI: 10.3390/ijerph20010879.*
8. *Maryanaji A., Ghalamkari B., Efazati S. Traffic Monitoring and Estimating Speed by Side-Looking FMCW Radar // Wireless Personal Communications. – 2023. – Vol. 133. – P. 851-867. – DOI: 10.1007/s11277-023-10794-6.*
9. Тимофеев Б.С., Мотыко А.А. Измерение скоростей автомобилей путем анализа видеопоследовательности // *Информационно-управляющие системы.*

2012. №1 (56). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-skorostey-avtomobilej-putem-analiza-videoposledovatel'nosti> (дата обращения: 03.02.2026).
10. Копенков В.Н., Мясников В.В. Оценка параметров транспортного потока на основе анализа данных видеорегистрации // КО. 2014. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-parametrov-transportnogo-potoka-na-osnove-analiza-dannyh-videoregistratsii> (дата обращения: 03.02.2026).
 11. Javadi S., Dahl M., Pettersson M. I. Vehicle speed measurement model for video-based systems // *Computers & Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 76. – P. 238-248. – DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.04.001.
 12. Skolnik M. I. *Introduction to Radar Systems*. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2001.
 13. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 26 с.
 14. Grubbs F.E. Sample criteria for testing outlying observations // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1950. – Vol. 21, No. 1. – P. 27-58. – DOI: 10.1214/aoms/1177729885.

REFERENCES

1. Vlasov A.A. *Teoriya transportnyh potokov: monografiya*. – Penza: PGUAS, 2014. – 124 s.
2. Khutornoi I. Estimation of optical speed measurement error for traffic monitoring systems // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 244. – 08023. – DOI: 10.1051/e3sconf/202124408023.
3. Eksperimental'noe obosnovanie podhodov k formirovaniyu metodiki ispytaniy podsystemy monitoringa parametrov transportnogo potoka / A.A. Svistel'nikov, A.A. Koveshnikov, P.V. Malyhina [i dr.] // *Dorogi i mosty*. – 2024. – № 2(52). – S. 287-305. – EDN: INRTEG.
4. Gribbon A.P. Field test of nonintrusive traffic detection technologies // *Mathematical and Computer Modelling*. – 1998. – Vol. 27, Issues 9-11. – P. 349-352. – DOI: 10.1016/S0895-7177(98)00069-7.
5. Sochor J., Juraneck R., Spanhel J., Marsik L., Siroky A., Herout A., Zemcik P. Comprehensive Data Set for Automatic Single Camera Visual Speed Measurement // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2019. – Vol. 20, No. 5. – P. 1633–1643. – DOI: 10.1109/TITS.2018.2825609.
6. Revaud J., Humenberger M. Robust Automatic Monocular Vehicle Speed Estimation for Traffic Surveillance // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. – 2021. – P. 4531-4541. – DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00451.
7. Zhao C., Ding D., Du Z., Shi Y., Su G., Yu S. Analysis of Perception Accuracy of Roadside Millimeter-Wave Radar for Traffic Risk Assessment and Early Warning Systems // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2023. – Vol. 20, No. 1. – Art. 879. – DOI: 10.3390/ijerph20010879.
8. Maryanaji A., Ghalamkari B., Efazati S. Traffic Monitoring and Estimating Speed by Side-Looking FMCW Radar // *Wireless Personal Communications*. – 2023. – Vol. 133. – P. 851-867. – DOI: 10.1007/s11277-023-10794-6.
9. Timofeev B.S., Motyko A.A. Izmerenie skorostej avtomobilej putem analiza videoposledovatel'nosti // *Informacionno-upravlyayushchie sistemy*. 2012. №1 (56). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-skorostey-avtomobilej-putem-analiza-vid-posledovatel'nosti> (data obrashcheniya: 03.02.2026).

10. Kopenkov V.N., Myasnikov V.V. *Ocenka parametrov transportnogo potoka na osnove analiza dannyh videoregistratsii* // KO. 2014. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-parametrov-transportnogo-potoka-na-osnove-analiza-dannyh-videoregistratsii> (data obrashcheniya: 03.02.2026).
11. Javadi S., Dahl M., Pettersson M. I. *Vehicle speed measurement model for video-based systems* // *Computers & Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 76. – P. 238-248. – DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.04.001.
12. Skolnik M.I. *Introduction to Radar Systems*. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2001.
13. GOST R 8.736–2011. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmerenii. Osnovnye polozheniya*. – M.: Standartinform, 2013. – 26 p.
14. Grubbs F.E. *Sample criteria for testing outlying observations* // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1950. – Vol. 21, No. 1. – P. 27-58. – DOI: 10.1214/aoms/1177729885.

Информация об авторах

А.А. Ковешников – заместитель начальника управления испытаний интеллектуальных транспортных систем, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

П.В. Мрыхина – начальник отдела научного обеспечения испытаний интеллектуальных транспортных систем, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

Н.Ю. Торопов – заместитель директора департамента цифровой трансформации, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

В.В. Феофанов – начальник отдела технического обеспечения испытаний интеллектуальных транспортных систем, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия,

Information about the authors

A.A. Koveshnikov – Deputy Head of the Intelligent Transportation Systems Testing Division, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

P.V. Malykhina – Head of the Scientific Support for Intelligent Transportation Systems Testing Section, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

N.Yu. Toropov – Deputy Director of the Digital Transformation Department, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

V.V. Feofanov – Head of the Technical Support for Intelligent Transportation Systems Testing Section, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Рецензенты: д-р экон. наук, начальник управления методов проектирования автомобильных дорог В.П. Миронюк (ФАУ «РОСДОРНИИ»); д-р техн. наук, профессор В.Н. Бойков (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)).

Статья поступила в редакцию 09.02.2026. Одобрена после рецензирования 01.04.2026. Принята к публикации 22.04.2026.

The article was submitted 09.02.2026. Approved after reviewing 01.04.2026. Accepted for publication 22.04.2026.