

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 656.13.05



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-1-61-67

Обзорная статья / Review article

Особенности математического моделирования безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах

Р.В. Гусейнов¹, П.А. Дадаева¹, М.М. Шабазов¹, М.Т. Муталибов¹, М.Р. Ахмедова²

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

²Кубанский государственный университет,

²350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является обоснование необходимости применения методов математического моделирования для решения проблем обеспечения безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах. **Метод.** Количественные методы анализа проблем безопасности дорожного движения (БДД) основаны на теории вероятностей, математической статистики, теории информации, многофакторном анализе, теории надежности, моделирования, программирования и других математических методов. **Результат.** Рассмотрены основные тенденции в исследовании проблем БДД. Указано, что математические зависимости влияния ограниченного количества факторов непригодны для удовлетворительного описания системы «водитель- автомобиль- дорога- среда» (ВАДС) в целом. Обращая внимание на неопределенность объектов, свойств и связей системы ВАДС обоснована необходимость использования системного подхода в решении этих проблем. Обсуждается необходимость учета региональных условий на БДД. Представлены математические модели, рекомендуемые для для решения проблем обеспечения безопасности дорожного движения. **Вывод.** Обобщение, систематизация огромного эмпирического материала ДТП, накопленного в результате конкретных исследований, с учетом экономических, социальных и демографических условий и разработка теоретических концепций на основе системных представлений являются важнейшими условиями решения проблем обеспечения БДД.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения; математическое моделирование; дорожно-транспортное происшествие; системный анализ; система ВАДС

Для цитирования: Р.В. Гусейнов, П.А. Дадаева, М.М. Шабазов, М.Т. Муталибов, М.Р. Ахмедова. Особенности математического моделирования безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(1):61-67. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-61-67

Features of mathematical modeling of road safety on highways

R.V. Guseynov¹, P.A. Dadaeva¹, M.M. Shabozov¹, M.T. Mutalibov¹, M.R. Akhmedova²

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²Kuban State University,

²149 Stavropol St., Krasnodar 350040, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the work is to apply mathematical modeling methods to solve problems of ensuring road safety on highways. **Method.** Quantitative methods for analyzing road safety problems (BDD) are based on probability theory, mathematical statistics, information theory, multifactor analysis, reliability theory, modeling, programming and other mathematical methods. **Result.** The main trends in the study of road safety problems are considered. It is indicated that the mathematical dependences of the influence of a limited number of factors are unsuitable for a satisfactory description of the “driver-vehicle-road-environment” (VADS) system as a whole. Paying attention to the uncertainty of objects, properties and connections of the VADS

system, the need to use a systematic approach in solving these problems is justified. The need to take into account regional conditions in road safety is discussed. Mathematical models recommended for solving problems of ensuring road safety are presented. **Conclusion.** Generalization, systematization of the vast empirical material of road accidents accumulated as a result of specific studies taking into account economic, social and demographic conditions and the development of theoretical concepts based on system representations are the most important conditions for solving the problems of ensuring road safety.

Keywords: road safety; mathematical modeling; traffic accident; system analysis; VADS system

For citation: R.V. Guseynov, P.A. Dadaeva, M.M. Shabozov, M.T. Mutalibov, M.R. Akhmedova. Features of mathematical modeling of road safety on highways. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(1):61-67. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-61-67

Введение. Автомобильный транспорт является наиболее гибким видом транспорта и находит бурное развитие во всем мире. Число автомобилей в России выросло за последние 15 лет почти на 42%. При этом число российских семей с двумя и более легковыми машинами увеличилось больше, чем в пять раз [1]. Рост числа автомобилей в условиях существующей транспортной инфраструктуры приводит к увеличению числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Тревожной является пока существующая тенденция роста последствий ДТП. Анализ статистических данных аварийности показывает, что ежегодно на дорогах мира гибнут 1,3 миллиона человек – один человек каждые 24 секунды (данные 2022 г.). Обращает на себя внимание высокая по сравнению со многими странами мира доля случаев со смертельным исходом в России. В 2022 году в РФ произошло 126 705 ДТП с пострадавшими. Каждое девятое — со смертельным исходом. За год на дорогах страны погибли 14 172 человека. «Смерть, потеря средств к существованию, инвалидность, трагедия и боль, финансовые последствия – дорожно-транспортные происшествия наносят семье и обществу огромный ущерб [2]. Ценность жизни человека признана практически во всем мире [3], а ее экономический эквивалент может достигать величин в US\$ 5–10 млн [4, 5].

В стране реализуются мероприятия национального проекта «Безопасные качественные дороги» федерального проекта «Безопасность дорожного движения». Определен целевой ориентир на 2023 год в части транспортного риска: количество погибших 2,25% на 10 тыс. транспортных средств, при этом «социальный риск» (количество погибших на 100 тыс. населения) должен снизиться до 8,9%. А значение показателя «удовлетворенность безопасностью дорожного движения» должен составить не менее 47%» [6]. В этой связи решение проблемы обеспечения безопасности дорожного движения (БДД) относится сегодня к приоритетным задачам развития страны.

Постановка задачи. Исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлено, что в результате ДТП в большей степени погибает наиболее работоспособная часть населения. Задача обеспечения безопасности дорожного движения (БДД) является особенно актуальной и сложной, поскольку ДТП, сопровождающиеся человеческими жертвами, пока имеют тенденцию к росту.

Кроме того, в результате ДТП нарушается нормальное функционирование процессов перевозок, что значительно снижает эффективность работы автомобильного транспорта. Существуют две тенденции в исследовании проблем БДД. Сторонники первой тенденции основное внимание уделяют изучению влияния отдельных факторов на вероятность ДТП. Вторая тенденция исследования проблемы БДД заключается в комплексном исследовании всех факторов системы «водитель – автомобиль- дорога – среда (ВАДС) одновременно. Оба направления исследований имеют свои преимущества и недостатки.

Целью работы является обоснование необходимости применения методов математического моделирования для решения проблем обеспечения безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах.

Методы исследования. Количественные методы анализа проблем БДД служат для выявления состояния, структуры и динамики ДТП, основанные на теории вероятностей, математической статистики, теории информации, многофакторном анализе, теории надежности, моделирования, программирования и других математических методов.

Обсуждение результатов. Как правило, разработка любой математической модели начинают с выбора независимых факторов и количественного критерия оптимизации. Чем больше количество рассматриваемых факторов, тем выше адекватность модели. Однако учет всех действующих факторов во многих случаях не удается и приводит к неоправданно сложным математическим моделям, решение которых или невозможно, или экономически нецелесообразно. Можно уменьшить их количество за счет отсеивания части факторов по результатам установления корреляционных связей между ними, но это не решает проблему. Сформулируем основные факторы, влияющие на вероятность ДТП на автомобильных дорогах. В рамках общепризнанного подхода к анализу особенностей функционирования любой автотранспортной системы, ее дифференцирование на подсистемы ВАДС они следующие [7];

1. Погодные условия, включая атмосферное давление, влажность, скорость ветра, концентрацию кислорода, могут негативно сказываться на способности человека управлять транспортными средствами.
2. Факторы, связанные с транспортным средством: выбор способа передвижения, размеры и массу транспортных средств, мощность двигателя и скоростные характеристики, техническое состояние и оборудование транспортных средств.
3. Факторы внешней среды: время суток, погодные условия, состояние дорожного покрытия, загруженность транспортного потока, проведение дорожно-ремонтных работ.
4. Дорожные факторы: качество дорожного покрытия, дорожная инфраструктура.
5. Факторы, тесно связанным с человеком-водителем в процессе дорожного движения: опыт вождения, психофизиологическое состояние, общий уровень соматического здоровья и т.д.

В результате исследований установлено, что на БДД влияет более 130 параметров системы ВАДС [8]. Для их упорядочения и систематизации предлагаются различные качественные методы и модели. Одним из известных методов является Матрица Хэддона. Это классический метод двумерной классификации значимых факторов риска аварийных ситуаций. Согласно данной модели, выделяются три фазы ДТП (до его возникновения, в процессе и после), а также три группы факторов, соответствующих каждой из этих фаз: особенности личности человека (участника движения), характеристики ТС и окружающей среды [9]. Можно сформулировать задачу следующим образом: необходимо с помощью эксперимента, который будет проводиться при неполном знании или незнании механизмов явлений, научиться строить математическую модель, связывающие ДТП со всеми переменными, от которых ДТП зависят. ДТП (его характеристики) можно представить в виде так называемого «черного ящика». Он будет иметь входы (независимые переменные, факторы) x_1, x_2, \dots, x_n (в нашем случае свойства системы ВАДС) и выходы (зависимые переменные, отклики, параметры оптимизации (в нашем случае- последствия ДТП)).

Наиболее наглядным показателем последствий ДТП является, так называемая, тяжесть ДТП [10–11], которая отражает долю погибших в общем числе пострадавших в ДТП. Для упрощения задачи в качестве параметра оптимизации можно использовать один количественный параметр (тяжесть ДТП) – Q. Существенным является то обстоятельство, что каждому набору уровней входов отвечают определенные значения выхода Q. Таким образом,

В этой формуле учитываются только элементы функциональной надежности водителя. Не учитываются техническая надежность автомобиля, техническая надежность дороги, вероятность влияния среды на надежность системы ВАДС, влияние которых на риск ДТП существенно. Кроме того, не учитываются степень профессиональной подготовленности, опыт профессиональной деятельности, профессионально важные качества, состояние физического здоровья, биологического возраста водителя, а также произведений удельно-весовых показателей надежностей R_{HBC} , $R_{HПH}$, $R_{HППП}$, $R_{Hд}$ в различных сочетаниях, характерные для водителя.

Основным недостатком такого направления исследований является недостаточный учет совместного влияния рассматриваемых факторов. Между тем, специфичность проблемы БДД заключается в том, что для ее кардинального решения необходимо учитывать все эти связи. В противном случае выводы из анализов не будут достоверными, а разработанные мероприятия по обеспечению БДД могут оказаться малоэффективными или даже вредными.

С целью разработки научно-обоснованных мероприятий по организации и обеспечению БДД необходимы комплексные исследования всей совокупности факторов, влияющих на БДД. Анализ работ по проблемам обеспечения БДД за последнее время показывает, что большинство ученых мира в максимальной степени исследовали особенности функционирования подсистем «Автомобиль» и «Дорога» (раздельно и во взаимосвязи), что способствовало качественному изменению конструкций транспортных средств и совершенствованию подходов к строительству и реконструкции дорог, в итоге – смене парадигм БДД. В то же время, влияние на БДД факторов, связанных с подсистемами «Водитель» (правильнее было бы «Человек») и «Среда», до сих пор изучено недостаточно полно [15]. ВАДС является сложной человека-машинной системой, состоящей из большого числа разнородных составляющих компонентов, имеет разветвленную структуру, причем ключевую роль на всех стадиях ее функционирования играет человек.

Все эти составляющие имеют различную природу и, как следствие, описываются различными моделями. Для такой системы трудно создать ее единую адекватную модель. Этим объясняет широкое разнообразие математических моделей (например, имитационное моделирование), описывающих те или иные параметры функционирования системы, но не пригодных для удовлетворительного ее описания в целом. Кроме того, исследования зарубежных авторов показывают на необходимость также учета таких факторов как медианный возраст населения; доля населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума; среднедушевые денежные доходы населения [16-19], оказывающих существенное влияние на дорожно-транспортную аварийность. Это особенно важно для РФ, так как регионы по этим показателям отличаются друг от друга. Авторы работы отмечают, что методы и практики управления БДД в субъектах Российской Федерации должны учитывать региональную специфику [20]. Наибольший риск характерен для самых молодых водителей автомобиля [21].

Таким образом, специфичность проблемы БДД заключается в том, что для ее кардинального решения необходимо учитывать кроме всех факторов системы ВАДС также экономические, социальные и демографические условия. В настоящее время наука о БДД располагает огромным эмпирическим материалом ДТП, накопленным в результате конкретных исследований. Его обобщение, систематизация с учетом экономических, социальных и демографических условий и разработка теоретических концепций на основе системных представлений представляются важнейшими условиями решения проблем обеспечения БДД.

Вывод. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Существует ряд математических моделей, описывающих влияние тех или иных факторов на вероятность ДТП, однако они непригодны для удовлетворительного описания ВАДС в целом.

2. Метод многофакторного планирования экспериментов для математического моделирования БДД непригоден из-за невозможности и экономической нецелесообразности проведения экспериментов в широком диапазоне изменения параметров.

3. Решение проблемы БДД требует учета совокупности множества факторов, влияющих на ДТП и их последствий. Однако ввиду неопределенностей объектов, свойств и связей системы ВАДС возникает необходимость использования системного подхода в решении этих проблем.

4. Существует прямая связь между социальными, экономическими, демографическими условиями и дорожно-транспортной аварийностью. Поэтому для кардинального решения проблем БДД необходимо их учитывать совместно с учетом свойств системы ВАДС. Это особенно важно для РФ, так как регионы по данным показателям отличаются друг от друга.

Библиографический список:

1. https://www.ng.ru/economics/2023-03-15/4_8680_cars.html – Дата доступа 24.10.2023.
2. <https://news.un.org/ru/story/2021/10/1412732> – Дата доступа 24.10.2023.
3. Прохоров Б.Б., Шмаков Д.И. Оценка стоимости статистической жизни и экономического ущерба от потерь здоровья // Проблемы прогнозирования. 2002. № 3. С. 125–135.
4. Прохоров Б.Б., Шмаков Д.И. Причины гибели людей в мирное время и экономическая стоимость потерь // Проблемы прогнозирования. 2013. № 4 (139). С. 139–147.
5. Быков А.А. О методологии экономической оценки жизни среднестатистического человека (пояснительная записка) // Проблемы анализа риска. 2007. Т. 4. № 2. С. 178–191.
6. https://bezdtp.ru/bezdtp/ru/events/o_48953.- Дата доступа 24.10.2023.
7. Степченко, А. В. Анализ основных факторов, влияющих на безопасность дорожного движения / А. В. Степченко // Наука без границ. – 2016. – № 3 – С. 24–28.
8. Амбарцумян В.В. Организация автомобильных перевозок и безопасность дорожного движения. Учеб. пособие для ВУЗов. - Ереван: Луйс, 1980. - 420 с.
9. Якупова Г.А. Повышение безопасности дорожного движения на основе системного подхода с применением современных методов и моделей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.10/Гульнара Анваровна Якупова – Казань, 2021.-19 с.
10. Adams J.G.U. Risk and Freedom: the Record of Road Safety Regulation. Cardiff: Transportation Publishing Projects, 1985. 202 p.
11. Abellan J., Lopez G., de Ona J. Analysis of traffic accident severity using decision rules via decision trees. Expert Systems with Applications, 2013, vol. 40, no. 15, pp. 6047–6054.
12. Давыдовский А.Г., Линник А.М. Системный анализ и математическое моделирование дорожно-транспортных происшествий в мегаполисе /Системный анализ и прикладная информатика. Минск, №1, 2019. С.4-7.
13. Атаев П.Г., Геллер Р.М., Липаткин Д.В. Методика анализа дорожно-транспортных происшествий с пострадавшими на примере Санкт-Петербурга /Транспорт Российской Федерации. №5(84). 2019. С.50-55.
14. Матросова Л. Д., Семенов Е. Ю. Прогнозирование показателей безопасности дорожного движения на основе статистического анализа // Л. Д. Матросова, Е. Ю. Семенов // Среднерусский вестник общественных наук. – 2016. – Т. 11, № 3. – С. 55–60.
15. Блинкин М.Я. Безопасность дорожного движения: история вопроса, международный опыт, базовые институции. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2013. 240 с.
16. Koornstra M. J. Prediction of traffic fatalities and prospects for mobility becoming sustainable safe. Sadhana, 2007, vol. 32, pp. 365–395.
17. Elvik R. A review of game-theoretic models of road user behavior. Accident Analysis & Prevention, 2014, vol. 62, pp. 388–396.
18. Reinfurt D.W., Stewart J.R., Weaver N.L. The economy as a factor in motor vehicle fatalities, suicides and homicides. Accident Analysis and Prevention, 1991, vol. 23, pp. 453–462.
19. Wagenaar A.C. Effects of macroeconomic conditions on the incidence of motor vehicle accidents. Accident Analysis and Prevention, 1984, vol. 16, pp. 191–205.
20. Петров А.И., Колесов В.И. Дорожно-транспортная аварийность в России: основные социально-экономические факторы ее формирования и пространственно-временные особенности // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2021. Т. 14. № 1. С. 199–220.
21. Evans L. Traffic Safety. Bloomfield, Mich.: Science Serving Society, 2004. 457 p.

References

1. https://www.ng.ru/economics/2023-03-15/4_8680_cars.html – Access date 24.10.2023. (In Russ)
2. <https://news.un.org/ru/story/2021/10/1412732> – Access date 24.10.2023. (In Russ).
3. Prokhorov B.B., Shmakov D.I. Assessment the cost of statistical life and economic damage from health losses. *Problems of forecasting*. 2002; 3:125-135. (In Russ).

4. Prokhorov B.B., Shmakov D.I. Causes of death in peacetime and the economic cost of losses. *Problems of forecasting*. 2013; 4 (139):139-147. (In Russ).
5. Bykov A.A. On the methodology of economic assessment of the life of an average person (explanatory note). *Problems of risk analysis*. 2007; 49(2):178-191. (In Russ).
6. https://bezdtp.ru/bezdtp/ru/events/o_48953 . Access date 24.10.2023. (In Russ).
7. Stepchenkov A.V. Analysis of the main factors affecting road safety. *Science without Borders*.2016;3:24-28. (In Russ).
8. Ambartsumyan V.V. Organization of road transport and road safety. Textbook for universities. -Yerevan: Luys, 1980:420.
9. Yakupova G.A. Improving road safety on the basis of a systematic approach using modern methods and models: Abstract of the Dissert. of the Cand. of Technical Scie.: 05.22.10/Gulnara Anvarovna Yakupova – Kazan, 2021:19.
10. Adams J.G.U. Risk and Freedom: the Record of Road Safety Regulation. Cardiff: Transportation Publishing Projects, 1985: 202 . (In Russ).
11. Abellan J., Lopez G., de Ona J. Analysis of traffic accident severity using decision rules via decision trees. *Expert Systems with Applications*, 2013; 40(15):6047–6054.
12. Davydovsky A.G., Linnik A.M. System analysis and mathematical modeling of traffic accidents in a megapolis. *System analysis and applied informatics*. Minsk, 2019;1:4-7.
13. Ataev P.G., Geller R.M., Lipatkin D.V. Methodology for analyzing road accidents with victims on the example of St. Petersburg. *Transport of the Russian Federation*. 20195(84):50-55.
14. Matrosova L. D., Semenov E. Yu. Forecasting road safety indicators based on statistical analysis .*Central Russian Bulletin of Social Sciences*. 2016;11(3):55–60
15. Blinkin M.Ya. Road safety: background, international experience, basic institutions. Moscow: *Publishing House of the Higher School of Economics*, 2013. 240 p.
16. Koornstra M. J. Prediction of traffic fatalities and prospects for mobility becoming sustainable safe. *Sadhana*, 2007; 32: 365–395.
17. Elvik R. A review of game-theoretic models of road user behavior. *Accident Analysis & Prevention*, 2014; 62: 388–396.
18. Reinfurt D.W., Stewart J.R., Weaver N.L. The economy as a factor in motor vehicle fatalities, suicides and homicides. *Accident Analysis and Prevention*, 1991; 23: 453–462.
19. Wagenaar A.C. Effects of macroeconomic conditions on the incidence of motor vehicle accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 1984; 16: 191-205.
20. Petrov A.I., Kolesov V.I. Road traffic accidents in Russia: the main socio-economic factors of its formation and spatio-temporal features. *Economic and social changes: facts, trends, forecast*. 2021;14(1):199-220. (In Russ).
21. Evans L. Traffic Safety. Bloomfield, Mich.: Science Serving Society, 2004;457.

Сведения об авторах:

Гусейнов Расул Вагидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации и безопасности движения, ragus05@mail.ru.

Дадаева Патимат Ариповна, аспирант кафедры организации и безопасности движения, ragus05@mail.ru.

Шабазов Марат Магомедкамилович, аспирант кафедры организации и безопасности движения, ragus05@mail.ru.

Муталибов Магомедсалих Такидинович, аспирант кафедры организации и безопасности движения; mutalibovm98@mail.ru.

Ахмедова Милена Расуловна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры мировой экономики и менеджмента, mili-g1@mail.ru.

Information about authors:

Rasul V. Guseinov Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Organization and Traffic Safety, ragus05@mail.ru.

Patimat A. Dadaeva, Postgraduate student, Department of Organization and Traffic Safety, ra-gus05@mail.ru.

Marat M. Shabazov, Postgraduate student, Department of Organization and Traffic Safety, ragus05@mail.ru.

Magomedsalikh T. Mutalibov, Postgraduate student, Department of organization and traffic safety; mutalibovm98@mail.ru.

Milena R. Akhmedova, Cand. Sci. (Economics), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of World Economy and Management; mili-g1@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 26.12.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 17.01.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 17.01.2024.