

УДК 614.842

**Е. О. Брызгина^а, С. С. Мокроусов^а, А. В. Аликов^а, О. С. Власова^а,
Н. В. Мензелинцева^б, Н. Ю. Клименти^в**

^а *Волгоградский государственный технический университет*

^б *Волгоградский государственный университет*

^в *Академия государственной противопожарной службы
Министерства по чрезвычайным ситуациям России*

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ВЫБРОСОВ АВТОТРАНСПОРТА В АТМОСФЕРУ ГОРОДА НА ОСНОВЕ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Транспорт является одним из основных загрязнителей атмосферы урбанизированных территорий. В международной практике к оценке выбросов применяется подход, основанный на моделировании движения транспортных потоков. Рассмотрены основные принципы разработки транспортных моделей. На основе транспортного моделирования проведена оценка снижения выбросов парниковых газов городским автомобильным транспортом г. Красноярска по базовому и расчетному сценариям. Показана перспективность использования бюджетных сенсорных датчиков для получения исходных данных о выбросах транспорта в атмосферу.

Ключевые слова: выбросы в атмосферу, транспортное моделирование, удельные выбросы, расчетный сценарий, базовый сценарий, урбанизированная территория.

Загрязнение воздуха является одной из главных современных проблем. По оценкам Всемирной организации здравоохранения порядка 92 % мирового населения проживает в районах, где уровень загрязнения превышает значения, установленные ВОЗ в рекомендациях по качеству воздуха [1].

Среди основных загрязнителей атмосферного воздуха выделяется автомобильный транспорт. В крупных городах Российской Федерации его суммарные выбросы загрязняющих веществ могут достигать 90 % [2].

Принятый в настоящее время в международной практике подход к оценке вредного воздействия выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) от автомобильного транспорта на здоровье населения основан на методологии анализа причинно-следственной связи между попаданием ЗВ в атмосферный воздух и ростом заболеваемости, смертности и сокращением ожидаемой продолжительности жизни (Impact Pathway Approach, IPA) [2].

Основой этой методики, как видно из рис. 1, является моделирование транспортных процессов. Важное место транспортному моделированию отводится в Транспортной стратегии РФ¹.

Транспортное моделирование — профессиональная деятельность, связанная с построением и исследованием транспортных моделей различного уровня, описывающих состояние и характеристики транспортных систем, транспортную доступность, транспортный спрос на грузовые и пассажирские перевозки, движение транспортных средств, пассажиро- и грузопотоки, технологические процессы и бизнес-процессы на транспорте, транспортные услуги, загрузку транспортной инфраструктуры, показатели безопасности функционирования транспорта и его влияния на окружающую среду, а также другие характеристики².

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161>.

² Там же.



Рис. 1. Методология оценки издержек,
 связанных с выбросами ЗВ автомобильным транспортом (IPA)

Перед транспортными моделями ставятся задачи по оценке и прогнозированию как основных параметров транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети (УДС), включающих скорость, плотность, интенсивность потока, время движения, пассажиропотоки на сети пассажирского транспорта общего пользования и ряд других показателей транспортного спроса (число поездок, объемы движения, структура по видам транспорта, по пунктам назначения поездок), так и выбросов парниковых газов от транспортных средств в окружающую среду. При этом учитывается неравномерность характеристик по времени суток.

Модель транспортной системы позволяет определить выброс в атмосферу вредных веществ от автотранспорта, учитывая реальную и перспективные ситуации, в т. ч. показатели расселения, застройки, социально-экономические характеристики, которые влияют на транспортный спрос, слои спроса. Расчет можно детализировать по маршрутам на всех участках графа транспортной сети, прогнозировать эффект от планируемых мероприятий в области строительства транспортной инфраструктуры, организации транспортного обслуживания населения, организацию дорожного движения (ОДД).

Известные подходы и модели анализа транспортной ситуации при решении задач ОДД для оценки выбросов в атмосферу можно классифицировать по уровню детализации и типу применяемого математического аппарата на макро-, мезо- и микромодели [3—5].

Макромодели, использующие методы аналогового моделирования, исследуют усредненные характеристики транспортного потока (скорость, плотность, интенсивность) на определенных участках УДС на основе детерминированных функциональных зависимостей.

Мезомоделям, занимающим промежуточное положение между макро- и микромоделями, присущ высокий уровень детализации исследуемой протяженной и разветвленной УДС при достаточно упрощенном описании динамики транспортного потока.

Микромодели воспроизводят (имитируют) режимы движения каждого автомобиля в потоке с учетом геометрических характеристик дороги, параметров автомобиля и косвенным учетом поведения и реакций водителя.

Выбор модели зависит:

- от основных характеристик объекта моделирования;
- имеющихся данных результатов обследования транспортных потоков и УДС;
- особенностей ОДД;
- функциональных задач проектирования и др.

Алгоритм моделирования городской транспортной сети представлен на рис. 2.

В общем случае для моделирования транспортной системы собираются исходные данные, которые можно сгруппировать следующим образом:

1. Основные характеристики УДС (например, дороги по технико-эксплуатационным характеристикам и функциональному назначению, характеристики поперечного сечения дороги, дорожки для велотранспорта, пешеходные зоны и тротуары, выделенные полосы для движения только общественного транспорта и т. д.).

2. Исходные данные по ОДД (данные скоростных режимов: скорость свободного движения, средняя скорость, скорость на отдельных участках УДС, установленное ограничение скорости и т. д.).

3. Данные о транспортном спросе (характеристики транспортных зон — интенсивность движения транспортных потоков на всех входах/выходах в зоне моделирования и пр.).

4. Данные для калибровки модели: интенсивность движения в контрольных точках, скорость проезда контрольных сечений на УДС, длина очередей АТС на контрольных пересечениях.

5. Данные для оценки массы выбросов вредных веществ автомобильным транспортом (структура парка автотранспортных средств по типу и потреблению используемого топлива, силовой установки, рабочему объему двигателя и экологическому классу).



Рис. 2. Порядок моделирования городской транспортной системы

Анализ проектных решений может состоять из различных сценариев: моделирование условий движения с учетом совершенствования ОДД и развития УДС при неизменном транспортном спросе, прогнозирование перспективного транспортного спроса при существующей схеме организации дорожного движения и транспортной инфраструктуре, либо совмещение этих подходов. Для каждого из рассматриваемых сценариев необходимо осуществить несколько расчетов по модели при различных начальных случайных числах, произвести статистическую обработку данных моделирования, провести анализ изменения прогнозируемых показателей уровня транспортного обслуживания и сделать выводы по проектным решениям.

Моделирование альтернативных проектных решений состоит из нескольких этапов: разработка альтернативных проектных решений; прогнозирование транспортного спроса для различных проектных решений; выбор индикаторов сравнения и определения эффективности проектных решений; моделирование возможных сценариев; статистическая обработка полученных

результатов; определение обеспечиваемого уровня транспортного обслуживания территорий поселения для различных проектных решений.

Качество ОДД, эффективность принятых проектных решений являются важным аспектом моделирования. Параметрами для сравнения различных вариантов должны быть различные критерии уровня транспортного обслуживания территорий (сетевые показатели мобильности и загруженности, временной и буферный индекс, сетевой и локальные уровни обслуживания), а также, при необходимости, такие первичные показатели, как время поездки, скорость, плотность движения, отношение интенсивности к пропускной способности, длина очереди, время задержки. Анализ эффективности должен проводиться на сетевом и локальном уровнях.

В качестве методологической основы для оценки экологической эффективности влияния предлагаемых решений на уменьшение выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта принимается «Пособие по расчету сокращения выбросов...»³, где содержатся рекомендации по формированию расчетных сценариев и применению набора моделей оценки транспортных выбросов. При расчетах наиболее часто используются методика НИИАТ [6] и методика ЕЕА/COPERT [7, 8].

Авторами статьи проведена оценка снижения выбросов парниковых газов городским автомобильным транспортом г. Красноярска вследствие внедрения предлагаемых мероприятий комплексной системы организации дорожного движения (КСОДД) на основе сравнения базового и проектного расчетных сценариев климатического воздействия автомобильного транспорта.

Базовый расчетный сценарий предусматривает отказ от реализации мероприятий КСОДД по организации дорожного движения и дорожно-мостовому строительству до 2033 г. Проектный расчетный сценарий предусматривает полную реализацию мероприятий КСОДД до 2033 г. в предусмотренные сроки.

Для каждого из расчетных сценариев с использованием транспортной модели Красноярска дана:

1. Оценка изменения структуры транспортного спроса между индивидуальным легковым автотранспортом и пассажирским транспортом общего пользования.
2. Оценка изменения средних скоростей движения по типам транспортных средств.
3. Оценка изменения суммарного годового пробега парка по типам транспортных средств.

На основе результатов транспортного моделирования на перспективу до 2033 г. с помощью программного обеспечения COPERT 4 и с учетом экспериментальных данных об удельных выбросах парниковых газов автотранспортными средствами, приведенных в Технических отчетах Европейского агентства по охране окружающей среды⁴, для базового и проектного сценариев

³ Пособие по расчету сокращения выбросов парниковых газов за счет проектов глобального экологического фонда в транспортной отрасли // Научно-технический консультативный совет., 2010. С. 42. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34580836.

⁴ ЕЕА Technicalreport №12/2013, ЕЕА Technicalreport №17/2014.

рассчитана ожидаемая годовая масса выбросов основных парниковых газов городским парком автомобильного транспорта.

Полученные оценки численности и структуры автомобильного парка Красноярска приведены в табл.

Результаты расчета массы выбросов основных парниковых газов по рассматриваемым сценариям приведены на рис. 3

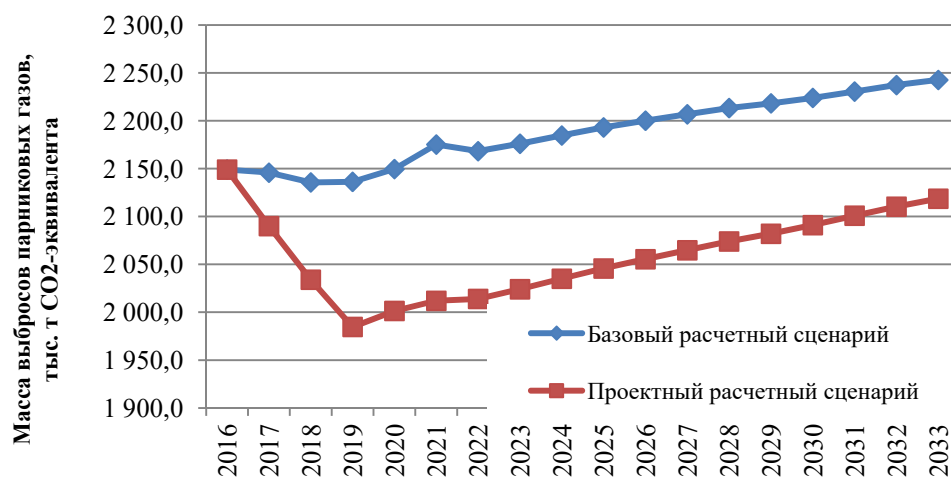


Рис. 3. Выбросы основных парниковых газов (сопоставление расчетных сценариев)

Значительное снижение выбросов парниковых газов автомобильным парком в 2019 г. обусловлено эффектом реализации к этому сроку 155 мероприятий КСОДД, которые, согласно результатам транспортного моделирования, суммарно обеспечивают рост суточного числа поездок с использованием всех видов пассажирского транспорта общего пользования на 90,4 тыс. (8,2 %) за счет снижения суточного числа междрайонных поездок с использованием индивидуального легкового автотранспорта на 6,9 % по отношению к базовому сценарию.

Точность результатов моделирования в значительной степени определяется исходными данными, прежде всего об удельных выбросах, которые принимаются по Техническим отчетам Европейского агентства по охране окружающей среды. Такой подход нельзя считать полностью корректным, т. к. он не в полной мере отражает реальную картину. На наш взгляд, решение ситуации возможно с использованием малогабаритных малобюджетных датчиков.

Имеется целый ряд достаточно доступных по стоимости коммерческих предложений бюджетных сенсорных датчиков различных производителей: мобильные пылемеры серии AirExpert Mini, датчик концентрации, температуры и влажности НТ-НЗ810, датчик концентрации в воздухе НТИ-НЗ820, портативный прибор для измерения массовой концентрации аэрозольных частиц Casella CEL-712-K1, анализатор Microdust Pro CEL-712, прибор Fluke 985, анализатор концентрации TUFF Pro и ряд других [9—14].

Основные характеристики функционирования автомобильного транспорта г. Красноярск

Показатели на начало года	По базовому расчетному сценарию								По проектному расчетному сценарию							
	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2033	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2033
Пассажирский транспорт общего пользования (автобусы)																
Транспортная работа, тыс. пасс.·км	10496,5	10706,5	10916,4	11126,4	11336,4	11546,3	11756,3	12386,2	11399,0	11690,8	11982,5	12274,2	12565,9	11399,0	13149,4	14024,5
Суточное число рейсов автобусов, тыс.	12,5	12,7	12,9	13,1	13,4	13,6	13,8	14,5	13,5	13,9	14,2	14,5	14,8	13,5	15,4	16,4
Средняя длина межрайонной поездки, км	9,20	9,20	9,21	9,22	9,23	9,24	9,24	9,25	9,37	10,05	10,17	10,30	9,16	9,37	9,35	9,64
Индивидуальный легковой автотранспорт																
Суточное число поездов, тыс.*	1175,5	1178,4	1182,2	1186,1	1190,0	1194,0	1198,1	1201,3	1109,0	1114,7	1121,3	1127,9	1134,6	1141,4	1148,2	1167,2
Средняя длина поездки, км	13,52	13,52	13,53	13,53	13,53	13,53	13,53	13,53	13,52	13,50	13,53	13,57	13,60	13,60	13,59	13,57
Грузовой автотранспорт																
Суточное число ездок, тыс.*	44,7	45,5	46,4	47,2	48,1	48,9	49,8	52,4	44,7	45,5	46,4	47,2	48,1	48,9	49,8	52,4
Средняя длина ездки, км	18,09	18,09	18,09	18,08	18,08	18,08	18,07	18,06	18,09	18,09	18,09	18,08	18,08	18,08	18,07	18,06

Наряду с явными достоинствами (цена, размер, вес, мобильность и количество потребляемой электроэнергии) мобильные датчики имеют и недостатки: короткий срок службы, существенное влияние на показания влажности воздуха, невысокую селективность, перекрестную чувствительность, вероятность «отравления», ежедневный дрейф нулевой отметки. Точность замеров ими ниже, чем приборами, использующими традиционные методы измерения, кроме того, нет единого подхода к оценке точности таких замеров [9—13].

Но бюджетные датчики уже вызвали большой общественный интерес, т. к. практически всегда можно провести замеры в требуемой точке и получить фактические значения концентраций вредных веществ, поэтому совершенствование работы таких устройств является актуальной задачей [9—13].

Заключение

В международной практике к оценке выбросов применяется подход, основанный на моделировании движения транспортных потоков, построении и анализе моделей мега-, мезо- и микроуровней, позволяющих уже на этапе проектирования решать разноплановые задачи, в т. ч. по оценке выбросов в атмосферу.

Авторами дан анализ подходов и моделей исследования транспортной ситуации при решении задач организации дорожного движения с целью снижения выбросов в атмосферу. Установлены основные факторы, влияющие на выбор метода моделирования. Выявлены особенности моделирования альтернативных проектных решений. Сформулированы основные требования к результатам расчетов по математической модели транспортных потоков.

На основе транспортного моделирования проведена оценка снижения выбросов парниковых газов городским автомобильным транспортом Красноярска по базовому и расчетному сценариям. Показана перспективность использования бюджетных сенсорных датчиков для получения исходных данных о выбросах транспорта в атмосферу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Донченко В., Кунин Ю., Рузский А., Виженский В. Методы расчета выбросов от автотранспорта и результаты их применения // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 3(86). С. 44—51.
2. Update of the Handbook on External Costs of Transport: Final Report. Report for the European Commission: DG MOVE Ricardo-AEA/R/ ED57769. 2014. Iss. 1. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Update-of-the-handbook-on-external-costs-of-final-Korzhenevych-Dehnen/f4ba3d542b4f8164f770566c25b671f9b6ffa9df>.
3. Особенности транспортного моделирования при оценке выбросов парниковых газов автотранспортом / В. Н. Азаров, Е. О. Брызгина, С. С. Мокроусов, О. С. Власова, Н. Ю. Клименти, Н. В. Мензелинцева // Инженерный вестник Дона. 2024. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2024/9511.
4. Потапова И. А., Бояришинова И. Н., Исмагилов Т. Р. Методы моделирования транспортного потока // Fundamental Research. 2016. № 10. С. 338—342.
5. Щеглов В. И. Организация и распределение транспортных потоков на основе математического моделирования // Инженерный вестник Дона. 2023. № 7. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2023/8665/.
6. Анализ загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом / А. В. Шемякин, В. В. Терентьев, К. П. Андреев, А. Б. Мартынушкин, И. Н. Кирюшин // Воронежский научно-технический вестник. 2022. № 2(40). С. 82—91.

7. *Ntziachristos L., Gkatzoflias D., Kouridis C., Samaras Z.* COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model // *Information Technologies in Environmental Engineering. Environmental Science and Engineering*. Springer. 2009. Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-88351-7_37.

8. *Ntziachristos L.* European database of vehicle stock for the calculation and forecast of pollutant and greenhouse gases emissions with TREMOVE and COPER // *Lab of Applied Thermodynamics 08.RE.0009*. 2008. Vol. 2. Thessaloniki, Greece. P. 260.

9. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities / P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. K.-A. Neophytou, S. Di Sabatino, M. Bell, L. Norford, R. Britter // *Environ. Int.* 2015. Vol. 75. Pp. 199—205. DOI: 10.1016/j.

10. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring. *Atmos* // R. Piedrahita, Y. Xiang, N. Masson, J. Ortega, A. Collier, Y. Jiang, K. Li, R. P. Dick, Q. Lv, M. Hannigan // *Measurement Tech.* 2014. Vol. 7. Pp. 3325. DOI: 10.5194/amt-7-3325-2014.

11. Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring / F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, A. Borowiak // *Atmosphere*. 2019. Vol. 10. Iss. 506. DOI: 10.3390/atmos10090506.

12. *Alexandre M., Gerboles M.* Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas // *Chem. Eng. Trans.* 2012. Vol. 30. Pp. 169—174.

13. Opportunistic mobile air pollution monitoring: a case study with city wardens in Antwerp / J. Bossche, J. Theunis, B. Elen, J. Peters, D. Botteldooren, B. Baets // *Atmos. Environ.* 2016. Vol. 141. Pp. 408—421.

14. Картографирование загрязнения атмосферного воздуха города с использованием мобильных пылемеров серии AirExpert Mini / А. В. Аликов, Н. С. Бакин, Е. О. Брызгина, Р. В. Сущенко, Н. В. Мензелинцева // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2024/9123

© Брызгина Е. О., Мокроусов С. С., Аликов А. В., Власова О. С.,
Мензелинцева Н. В., Клименти Н. Ю., 2025

*Поступила в редакцию
в декабре 2024 г.*

Ссылка для цитирования:

Оценка и прогноз выбросов автотранспорта в атмосферу города на основе транспортного моделирования / Е. О. Брызгина, С. С. Мокроусов, А. В. Аликов, О. С. Власова, Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Клименти // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2025. Вып. 1(98). С. 104—113. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_104.

Об авторах:

Брызгина Екатерина Олеговна — аспирант каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; bryazginaeo@gmail.com

Мокроусов Сергей Сергеевич — аспирант каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; mokrousov@bk.ru

Аликов Александр Витальевич — аспирант каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; alexhall@yandex.ru

Власова Оксана Сергеевна — канд. техн. наук, доц., доц. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; vlasova_oksana@mail.ru

Мензелинцева Надежда Васильевна — д-р техн. наук, проф., проф. каф. экологии и природопользования, Волгоградский государственный университет. Российская Федерация, 400062, г. Волгоград, просп. Университетский, 100; menzelintseva@volsu.ru

Клименти Николай Юрьевич — канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отделения проблем управления системами обеспечения пожарной безопасности учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности, полковник внутренней службы, Академия

ГПС МЧС России. Российская Федерация, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4;
klimenti84@mail.ru

**Ekaterina O. Brayzgina^a, Sergey S. Mokrousov^a, Alexander V. Alikov^a,
Oksana S. Vlasova^a, Nadezhda V. Menzelinceva^b, Nikolay Yu. Klimenti^c**

^a *Volgograd State Technical University*

^b *Volgograd State University*

^c *Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*

ASSESSMENT AND FORECASTING OF VEHICLE EMISSIONS INTO THE CITY ATMOSPHERE BASED ON TRANSPORT MODELING

Transport is one of the main polluters of the atmosphere of urbanized areas. In international practice, an approach based on modeling of traffic flows is used to assess emissions. The main principles of developing transport models are considered. Based on transport modeling, an assessment of the reduction of greenhouse gas emissions by urban motor transport in Krasnoyarsk was carried out according to the baseline and calculated scenarios. The prospects of using low-cost sensors to obtain initial data on transport emissions into the atmosphere are shown.

Key words: atmospheric emissions, transport modeling, specific emissions, calculation scenario, baseline scenario, urbanized area.

For citation:

Brayzgina E. O., Mokrousov S. S., Alikov A. V., Vlasova O. S., Menzelinceva N. V., Klimenti N. Yu. [Assessment and forecasting of vehicle emissions into the city atmosphere based on transport modeling]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 1, pp. 104—113. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_104.

About authors:

Ekaterina O. Brayzgina — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; bryazginaeo@gmail.com

Sergey S. Mokrousov — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; mokrousov@bk.ru

Alexander V. Alikov — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; alexxall@yandex.ru

Oksana S. Vlasova — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; vlasova_oksana@mail.ru

Nadezhda V. Menzelinceva — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State University (VSU). 100, University Avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation; menzelintseva@volsu.ru

Nikolay Yu. Klimenti — Candidate of Engineering Sciences, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 4, Boris Galushkin st., Moscow, 129366, Russian Federation; klimenti84@mail.ru