

УДК 625.712.63

A. B. Макаров, B. B. Габова, N. A. Квитко

Волгоградский государственный технический университет

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ КАК ВАЖНЫЙ КРИТЕРИЙ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ

Долговечность железобетонных мостов — один из трех критериев их функциональности. На железобетонную конструкцию действует агрессивная среда в виде атмосферных осадков, что влияет на протекающие в материале физико-химические процессы. Показано, что на коррозию цементного камня влияют растворенные в воде соединения хлора, серы, сульфаты, кислоты и углекислый газ в виде угольной кислоты. Защита мостовых конструкций выражается в гидроизоляции плиты проезжей части современными изоляционными материалами. Однако влага проникает сквозь асфальтобетонное покрытие и накапливается в толще мостового полотна. При замерзании она увеличивает трещины и поры; просачиваясь, способствует коррозии бетона. Вывести накапливающуюся влагу можно посредством дренажных устройств в толще мостового полотна. Структура из гранитного щебня, связанного эпоксидной смолой, позволяет собирать и удалять влагу из-под асфальтобетонного слоя мостового полотна.

Ключевые слова: цементный камень, гидроизоляция, коррозия бетона, выщелачивание, дренажное устройство, алит, белит, защита от влаги.

Долговечность железобетона в значительной степени зависит от структуры бетона, которая формируется в процессе твердения. Структура материала определяется качеством компонентов бетона и водоцементным отношением W/C смеси. Какова долговечность сооружений из бетона и от чего она зависит? Нормативы определяют срок службы не материала, а сооружений из них. К примеру, срок службы моста из сборного железобетона 40—50 лет [1]. Хотя мосты служат гораздо дольше, если за ними следят [2, 3]. Что говорить о римском Пантеоне, построенном из бетона почти две тысячи лет назад. Значит, бетонные мосты могут служить гораздо дольше, чем считается. Одним из аспектов долговечности является структура бетона. Она неоднородна и состоит из цементного камня, крупного заполнителя, пор и капилляров, местных разрыхлений и трещин. Цементный камень, сформированный из минералов, продуктов гидратации и зерна цемента, не прошедших гидратацию, не является стабильной системой, так как здесь постоянно протекают химические и физико-химические реакции и превращения. Главные минералы портландцементного клинкера, представляющие собой твердые растворы, это: алит с формулой $Ca_{106}Mg_2(Na_{1/4}K_{1/4}Fe_{1/2})O_{36}(Al_2Si_{34}O_{44})$ и белит с формулой $Ca_{87}Mg \cdot Al \cdot Fe(Na_{1/2} \cdot K_{1/2})(Al_3Si_{42}O_{180})$.

Из-за большого количества примесей в структурах альта и белита минерал получается дефектный, неустойчивый и, главное, химически активный. В процессе гидролиза этих минералов и в результате последовательного ряда химических реакций образуются следующие соединения кальция: гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроалюмоферриты. Примеси, внедрившиеся в тетра- и октаэдрические пространства минералов, составляют активную часть структуры цементного камня. Тут и кроется причина коррозии цементного камня при контакте примесей с водой, находящейся в порах конструкций.

Долговечность бетона определяется временем от начала его эксплуатации до наступления разрушения. И это время можно существенно увеличить, если правильно эксплуатировать сооружение [4].

От проникновения влаги в конструкцию пролетного строения моста защищает гидроизоляционный слой мостового полотна. Устройство гидроизоляции — важнейший технологический процесс, контролируемый представителем строительного контроля. В настоящее время в России выпускаются прекрасные гидроизоляционные материалы, специально разработанные для мостовых сооружений¹. Качество гидроизоляционных материалов различных видов и фирм исследовалось многими специалистами [5]. Наиболее часто применяется техноэластом — гидроизоляционный битумно-полимерный рулонный материал, обладающий высокими характеристиками по прочности, гибкости и надежности, со сроком службы не менее 60 лет. Производится в двух модификациях: марки С и Б [4]. Технология устройства гидроизоляции плиты проезжей части предусматривает надежное приkleивание материала к подготовленной поверхности с продольными и поперечными нахлестами (рис. 1).

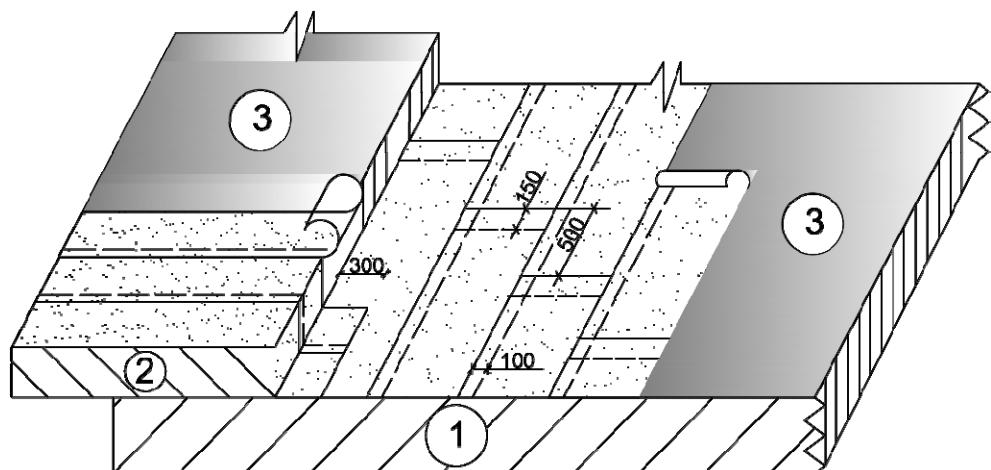


Рис. 1. Технология устройства гидроизоляции плиты проезжей части: 1 — плита проезжей части; 2 — тротуарная плита; 3 — поверхность, покрытая слоем праймера

Если при устройстве гидроизоляции нарушена технология производства работ [6], был допущен брак или использовались некачественные материалы, то изоляция не справляется со своими функциями. Агрессивная среда начинает контактировать с цементным камнем, что запускает процесс коррозии. Обследование моста в Волгограде выявило коррозионные процессы в плите проезжей части [7], представленные на рис. 2. Эти выводы подтверждаются исследованиями других специалистов [8, 9].

На цементный камень железобетонных конструкций моста, не защищенных от контакта с атмосферной влагой, влияет химически агрессивная воздушная среда. В зависимости от имеющихся в атмосфере соединений хлора,

¹ Корпорация «ТехноНИКОЛЬ». URL: <https://www.tn.ru/catalogue/dlya-fundamentov/208>.

серы, сероводорода, углерода, которых в атмосфере городов большое количество, образуются соединения, которые, вступая в реакцию с водой, составляют вредные для бетонов среды — хлоридную, сульфатную, кислотную. Процессы, протекающие в бетоне при контакте с агрессивной средой, представлены в табл.



a

б

Рис. 2. Коррозионные процессы в плите проезжей части:
а — карбонизация бетона плиты проезжей части, разрушение защитного слоя бетона, обнажение и коррозия арматуры; *б* — трещины в тротуарной консоли, высолы, образование карбонатов, коррозия стальных кронштейнов

Развитие коррозионного процесса приводит к снижению плотности и, соответственно, происходит снижение прочности бетона. И тогда конструкция может потерять свои эксплуатационные качества и перейти в предельное состояние. Таким образом, видно, что влага является проводником агрессивных сред в бетон и необходимо не допустить ее проникновение в конструкцию моста.

Длительный процесс растворения вымывания кальция из цементного камня при постоянном просачивании влаги приводит к образованию и росту сталактитов (рис. 3).

Важнейшей проблеме — устройству водоотвода с проезжей части мостов — посвящено много работ [10—15]. Устройство водоотвода с поверхности проезжей части моста и тротуаров не всегда решает проблему защиты конструкций от проникновения влаги. Влага дренирует сквозь асфальтобетон покрытия, особенно когда атмосферные воды застаиваются на поверхности моста [16] (рис. 4). Такое случается, если уклоны не соответствуют нормативным требованиям. Влага при этом накапливается в конструкции мостового полотна и просачивается через трещины гидроизоляционного слоя. В период переменных температур влага замерзает, разрушая поры и увеличивая трещины, в которых собирается еще больше влаги [17].

Коррозионные процессы в бетоне

Вид коррозии	Процессы в бетоне
Хлоридная коррозия	<p>Миграция ионов хлора через области микротрещин, капилляров и открытые поры. Хлориды попадают в бетон антиобледенителями типа пескосолевой смеси. Хлор частично связывается в $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$, но большая его часть остается в водном поровом растворе. Для портландцемента отношение Cl^-/OH^- уменьшается с повышением содержания C_3A. Скорость хлоридной коррозии для композиционных цементов несколько ниже, чем для обычного портландцемента. Связывание ионов Cl^- и их диффузационная способность определяют интенсивность хлоридной коррозии</p>
Сульфатная коррозия	<p>Возникает под действием вод, содержащих сульфаты в виде сернокислых соединений $CaSO_4$, Na_2SO_4, $MgSO_4$. При этом не происходит вымывание продуктов реакции из объема цементного камня, а, наоборот, образуются новые соединения, которые остаются в цементном камне и объем которых превышает исходный объем твердой фазы. Сульфат-ионы, содержащиеся в водных растворах, проникают в цементный камень и взаимодействуют с алюминатными минералами, что приводит к образованию этtringита</p> $6Ca^{2+} + 2Al(OH)_4^{1-} + 4OH^{1-} + 3SO_4^{2-} + 26H_2O \rightarrow C_6AS_3H_{32},$ <p>который, кристаллизуясь, занимает объем в 4,76 раза больший, чем исходные соединения. Результатом этого являются внутренние напряжения, которые могут превысить предел прочности цементного камня на растяжение и вызвать трещины или разрушение материала.</p> <p>Также сульфатная коррозия ведет к образованию гипса</p> $Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow CSH_2.$ <p>Этtringит и гипс образуются кристаллизацией из раствора²</p>
Кислотная коррозия	<p>Портландцемент не является стойким к действию кислот, и наиболее сильное действие на него оказывают однопроцентные растворы соляной, серной, азотной кислот. Отрицательное воздействие кислот начинает проявляться уже при $pH = 6$. Действие кислоты сводится к ее реакции с $Ca(OH)_2$ и гидросиликатами кальция. В результате этого образуются легкорастворимые соли, которые вымываются из тела бетона. Химические реакции взаимодействия бетона с кислыми средами рассмотрим на примере соляной кислоты. Реакции проходят по следующей схеме:</p> $Ca(OH)_2 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + 2H_2O;$ $2CaO \cdot SiO_2 \cdot 3H_2O + 4HCl \rightarrow 2CaCl_2 + SiO_2 + 5H_2O.$ <p>Образующиеся в результате реакций нерастворимые соединения в виде рыхлых масс гидроксида кремния, алюминия или железа остаются в бетоне. Гидроалюминаты наименее стойки к действию кислот</p>

² Там же.

Вид коррозии	Процессы в бетоне
Углекислотная коррозия	<p>Кислые газы, находящиеся в атмосфере, главным образом углекислый газ, вызывающий углекислотную коррозию. Углекислый газ, находящийся в воздухе, вступая в реакцию с водой атмосферы, образует угольную кислоту, которая в виде осадков попадает на проезжую часть мостов. Угольная кислота является очень слабой, но даже она может подвергнуть цементный камень химической коррозии. Этот вид коррозии отличается своеобразием и протекает в два этапа. Вначале идет реакция взаимодействия гидроксида кальция с CO_2 воздуха и водяными парами:</p> $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O},$ <p>затем реакция продолжается с образованием кислого углекислого кальция:</p> $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2.$ <p>Образующийся продукт растворим в воде. Процесс коррозии происходит с образованием кислого углекислого кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, и такой вид коррозии называют углекислотной</p>
Углекислая коррозия	Процесс может протекать и в воздушной среде, тогда коррозию цементного камня называют углекислой
Выщелачивание	При насыщении бетона неагрессивной дождевой водой вначале происходит постепенное растворение содержащихся в цементном камне кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и вынос минерала из структуры бетона. Нарушается химическое равновесие между поровой жидкостью и основными составляющими цементного камня, которые подвергаются гидролизу, что приводит к образованию дополнительных пор и разрушению цементного камня. При периодическом воздействии пресной воды в виде дождя вначале на поверхности нижней грани плиты появляется белый известковый налет, затем в местах капельного стекания воды образуются известковые наросты в виде природных сталактитов



Рис. 3. Кальциевые сосульки — сталактиты на плите проезжей части



Рис. 4. Вода на тротуаре моста: *a* — отсутствуют уклоны; *б* — нет водоотвода с тротуара

Зашить конструкцию мостового полотна и вместе и ней и плиту проезжей части можно, если удалять собирающуюся там влагу. Сконцентрировать воду мостового полотна в одном месте можно с помощью дренажа. Дренажный канал заделывается внутри мостового полотна непосредственно на гидроизоляционном слое [6]. Он представляет собой пористую и вместе с тем прочную структуру, выдерживающую строительную и временные нагрузки и позволяющую дренирующей через асфальтобетон воде собираться в ее пустотах. Далее вода удаляется через трубку, закрепленную в железобетонной плите. Конструкция мостового полотна с дренажным каналом представлена на рис. 5. Дренажный канал заполнен специально изготовленной структурой, обладающей прочностью и пористостью для сбора просочившейся влаги. Пористость материала возникает из-за пустот между зернами щебня.

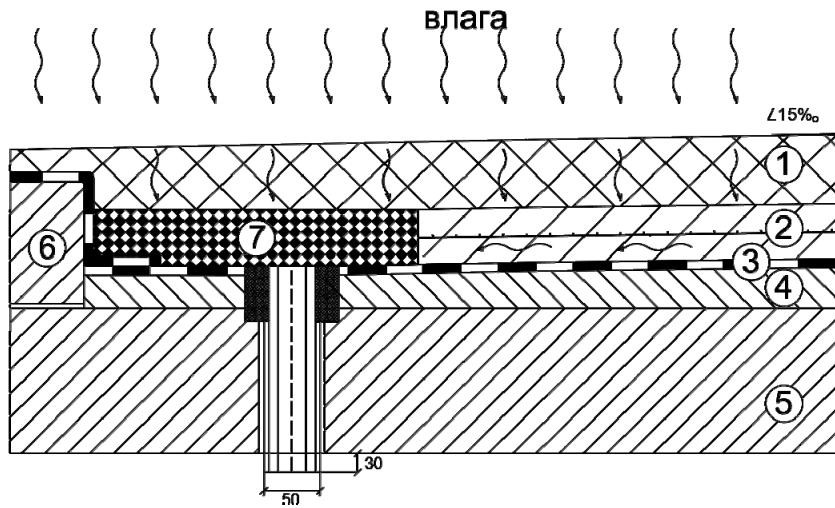


Рис. 5. Дренаж для сбора и удаления влаги из мостового полотна:
1 — асфальтобетонное покрытие; 2 — защитный слой; 3 — гидроизоляция;
4 — выравнивающий слой; 5 — плита проезжей части; 6 — тротуарная плита;
7 — дренажный канал

В составе структуры дренажа — гранитный щебень фракции 10...15 мм и эпоксидный клей в качестве связующего. Соотношение «щебень — эпоксидный клей» составляет 16 : 1. Клей на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердитель полиэтиленполиамин и пластификатор дибутилфталат в соотношении 100 : 11 : 10. Пустотность такой структуры более 50 %, а прочность около 5 МПа, что в полной мере отвечает требованиям к структуре дренажа. Такой конгломерат, условно называемый «козинаки» [18], представлен на рис. 6.



Рис. 6. Материал дренажного канала «козинак»

Заключение

Повышение долговечности мостовых сооружений позволит снизить затраты на демонтаж старых, отслуживших сооружений и новое строительство. Кроме того, увеличится период между текущими и капитальными ремонтами мостов. Дополнительные затраты на устройство при строительстве или ремонте мостов дренажных каналов в мостовом полотне ничтожны по сравнению с увеличением срока службы мостов. Разумеется, на увеличение долговечности железобетонных сооружений оказывает влияние не только изоляция конструкций от проникновения агрессивной влаги. Нельзя сбрасывать со счетов качество используемых материалов, соблюдение технологии строительства, качество изыскательских работ и другие факторы. Но защита конструкций от влаги остается важнейшим фактором сохранения функциональности мостовых сооружений. Влага, дренирующая через асфальтобетонное покрытие, имеет малый объем и удаляется с конструкций без сбора и очистки. Таким образом, устройство дренажных систем в мостовом полотне позволит увеличить долговечность мостовых сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мосты и сооружения на дорогах : учеб. для вузов : в 2 ч. Ч. 2 / П. А. Саламахин, О. В. Воля, Н. П. Лукин и др. ; под ред. П. М. Саламахина. М. : Транспорт, 1991. 448 с.
2. Макаров А. В., Калиновский С. А., Ерещенко Т. В., Павлова М. А. Вопросы экономичного восстановления эксплуатационных свойств мостов // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2020. Вып. 4(81). С. 96—103.

3. Габова В. В., Поляков В. Г., Савенкова В. П., Засадченко И. А. Исследование и повышение эффективности защитных строительных конструкций на автомобильной заправочной станции // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2024. Вып. 2(95). С. 14—23. DOI: 10.35211/18154360_2024_2_14.
4. Овчинников И. Г., Распоров О. Н., Овчинников И. И. Обеспечение долговечности автодорожных мостов — пути решения проблемы // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог : сб. науч. тр. ОАО «ГИПРОДОРНИИ». 2014. № 5(64). С. 36—43.
5. Овчинников И. Г., Овчинников И. И., Валиев Ш. Н., Жеденова С. В. Систематизация и сравнительный анализ различных типов гидроизоляции, применяемых на автодорожных мостовых сооружениях // Науковедение. 2013. № 5(18).
6. Сахарова И. Д., Казарян Ю. В. О конструкциях дорожных одежд на мостовых сооружениях с железобетонной плитой проезжей части // Информац. вестн. «Мособлгосэкспертиза». 2009. Вып 4(27). С. 35—38.
7. Макаров А. В., Шатлаев С. В., Гулуев Г. Г. Гидроизоляция железобетонных мостов — основная защита конструкций от коррозии // Инженер. вестн. Дона. 2017. № 2.
8. Пискун А. С., Ганец Г. В., Аверченко Г. А. Методы натурного обследования железобетонного моста на примере моста через реку Косопаша // Вестн. МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 957—967.
9. Овчинников И. Г., Зинченко Е. В. Анализ особенностей устройства гидроизоляции некоторых типов на мостовых сооружениях с железобетонной плитой проезжей части // Проблеми водопостачання, водовідведення та гіdraulіки : науково-технічний збірник. Вип. 17. Київ : КНУБА, 2011. 120 с. С. 55—59.
10. Совершенствование систем водоотвода с мостового полотна автодорожных мостов / О. К. Петропавловских, А. А. Ибрагимова, Р. Р. Садыков, А. Р. Галиев, Р. Ф. Губайдуллин // Изв. КГАСУ. 2022. № 1(59). С. 113—125.
11. Малышкина А. В., Овчинников И. И. Современные конструкции дорожных одежд на мостовых сооружениях с железобетонной плитой проезжей части // Вестн. Евразийской науки. 2021. № 3. URL: <https://esj.today/PDF/20SAVN321.pdf>.
12. Vlček P., Končický J. Water impact reduction on the deck of the bridge structure by using complete drainage installation // Procedia Engineering. 2012. Vol. 40. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.130.
13. Пузанкова К. А., Логинова О. А. Обзор существующих методик гидравлических расчетов водоотводных подвесных лотков мостовых сооружений // Техника и технология транспорта. 2021. № 2(21).
14. Костинский В. А. Гидроизоляция транспортных сооружений. URL: gspm.narod.ru/Publications/Gidroizol.htm.
15. Обследование мостовых сооружений с помощью современного оборудования / А. В. Макаров, Е. В. Крошинева, А. Ф. Файзалиев, М. А. Павлова, Д. М. Лепехина // Инженер. вестн. Дона. 2021. № 7. С. 10. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7095>.
16. Макаров А. В., Тян В. Ю., Журавлев А. В. Астраханский мост в Волгограде: символ и проблемы // Инженер. вестн. Дона. 2018. № 4. 9 с. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5320>.
17. Yang Z. J., Li Q., Xu G., Hulsey J. L. Seasonal freezing effects on the dynamic behavior of highway bridges // GeoShanghai International Conference — Soil Dynamics and Earthquake Engineering : proceedings of the 2010 GeoShanghai International Conference. Shanghai, 2010. Pp. 162—168.
18. Сахарова И. Д., Казарян В. Ю. Новые конструктивно-технологические решения в мостовом полотне // Дороги. Инновации в строительстве. 2013. Апр. С. 36—39.

© Макаров А. В., Габова В. В., Квятко Н. А., 2025

Поступила в редакцию
02.10.2025

Ссылка для цитирования:

Макаров А. В., Габова В. В., Квятко Н. А. Долговечность железобетонных мостов как важный критерий их функциональности // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 4(101). С. 93—101. DOI: 10.35211/18154360_2025_4_93.

Об авторах:

Макаров Александр Владимирович — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; pr.makarov@mail.ru

Габова Виктория Викторовна — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; gabovavv@yandex.ru

Квятко Никита Андреевич — студент, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; quitcko.nickita2017@yandex.ru

Aleksandr V. Makarov, Victoria V. Gabova, Nikita A. Kvityko

Volgograd State Technical University

THE DURABILITY OF CONCRETE BRIDGES AS AN IMPORTANT CRITERION OF THEIR FUNCTIONALITY

The durability of reinforced concrete bridges is one of the three criteria for their functionality. The reinforced concrete structure is exposed to an aggressive environment in the form of precipitation, which affects the physical and chemical processes occurring in the material. It has been shown that chlorine, sulfur, and sulfate compounds dissolved in water influence the corrosion of the cement stone. Acids and carbon dioxide in the form of carbonic acid also affect the corrosion process. To protect bridge structures, it is necessary to waterproof the roadway slab using modern insulation materials. However, moisture penetrates the asphalt concrete pavement and accumulates within the bridge deck. When it freezes, it enlarges cracks and pores; when it seeps through, it promotes concrete corrosion. Accumulating moisture can be removed using drainage systems within the bridge deck. A structure of crushed granite bonded with epoxy resin collects and removes moisture from beneath the asphalt concrete layer of the bridge deck.

К e y w o r d s: cement stone, waterproofing, concrete corrosion, leaching, drainage device, alit, whitewash, moisture protection.

For citation:

Makarov A. V., Gabova V. V., Kvityko N. A. [The durability of concrete bridges as an important criterion of their functionality]. *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. 4, pp. 93—101. DOI: 10.35211/18154360_2025_4_93.

About authors:

Aleksandr V. Makarov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; pr.makarov@mail.ru

Victoria V. Gabova — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; gabovavv@yandex.ru

Nikita A. Kvityko — student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; quitcko.nickita2017@yandex