

УДК 624.21.093.004

С. В. Чижов, В. С. Прокопович, Э. Т. Яхшиев**ОБОСНОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ
ПОД ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ МАГИСТРАЛИ
В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

Дата поступления: 01.04.2016

Решение о публикации: 10.05.2016

Цель: Обосновать возможность применения дисперсно-армированных конструкций пролётных строений на высокоскоростных железнодорожных магистралях. **Методы:** Для решения научно-прикладной задачи применяли методы натурного обследования и лабораторных испытаний, а также методы математического моделирования работы конструкции пролётного строения. Использование сравнительного анализа данных, полученных методом математического моделирования, с реальными параметрами эксплуатируемых пролётных строений, характеризующим их фактическое состояние, обеспечивает достоверность результатов исследования. Моделирование статической и динамической работы пролётного строения выполнено для различных сочетаний временных нагрузок от подвижного состава. Схемы нагрузок приняты на основе фактического подвижного состава высокоскоростных поездов, эксплуатируемых в Республике Узбекистан. **Результаты:** Обоснована возможность использования дисперсно-армированных пролётных строений в сети высокоскоростных железнодорожных магистралей. Рассчитана оптимальная конструкция пролётного строения под региональные особенности Республики Узбекистан. **Практическая значимость:** Использование результатов исследования при проектировании и строительстве пролётных строений позволяет оптимизировать их характеристики под региональные особенности, повысить показатели надёжности мостовых переходов на высокоскоростных магистралях по безотказности и долговечности. Разработанная методическая основа для назначения конструктивных и технологических решений, связанных с проектированием и строительством дисперсно-армированных пролётных строений на высокоскоростных магистралях, позволяет принимать оптимальные решения, повышающие надёжность таких конструкций.

Дисперсно-армированное пролётное строение, фибра, высокоскоростная магистраль, надёжность, долговечность, безотказность, трещиностойкость, динамика, подвижной состав, технология бетонирования.

Sergei V. Chizhov, Cand. Eng., assistant professor, **Vladimir S. Prokopovich**, assistant professor, ***Elbek T. Yakhshiyev**, postgraduate student, elbek-8420@mail.ru (Petersburg State Transport University)
JUSTIFICATION OF DESIGN RELIABILITY OF PARTICULATE-REINFORCED SUPERSTRUCTURES FOR HIGH-SPEED RAILWAY LINE IN THE CONDITIONS OF REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Objective: To justify possibility of using dispersion-reinforced concrete in construction of superstructures on high-speed railways. **Methods:** To solve scientific and applied problems, methods of field survey and laboratory tests were used, as well as methods of mathematical simulation of superstructure operation. The use of comparative analysis of data obtained by mathematical simulation with real parameters of superstructures being operated, characterising their actual state, ensures validity of research results. Simulation of static and dynamic work of superstructures is performed for various combinations of

temporary loads from rolling stock. Load schemes were adopted on the basis of the actual rolling stock of high-speed trains operated in the Republic of Uzbekistan. **Results:** The study justifies using particulate-reinforced superstructures on high-speed lines. Optimum design of bridge superstructure for regional peculiarities of the Republic of Uzbekistan is calculated. **Practical importance:** Research results can be used in the design and construction of superstructures, allowing to optimise their characteristics to conform to regional peculiarities, to enhance the reliability of bridges on high-speed railways for reliability and durability. Development of methodical basis for setting out constructive and technological solutions related to the design and construction of dispersion-reinforced superstructures on high-speed railways allows to make optimal decisions that improve reliability of such designs.

Particulate-reinforced superstructure, fiber, high-speed railway, safety, durability, reliability, fracture resistance, dynamics, rolling stock, technology of concreting.

Чтобы определить функциональные требования к мостам на высокоскоростных железнодорожных магистралях (ВСЖДМ), выбрать параметры мостового перехода, обосновать характеристики конструкции моста, необходимо учитывать факторы, влияющие на состояние конструктивных элементов в период эксплуатации, включая временную нагрузку, климатические, сейсмические и другие виды воздействий, характерных для региональных особенностей Узбекистана. Обоснованное определение и назначение таких характеристик на этапах инженерных изысканий, проектирования и строительства обеспечивают безопасную эксплуатацию и надёжность моста в процессе установленного срока службы.

Анализ строительства мостов на ВСЖДМ в мире убедительно доказывает, что приоритетным направлением в строительстве мостовых сооружений в условиях высоких скоростей подвижного состава является использование железобетонных конструкций пролётных строений. Это объясняется тем, что железобетонные конструкции обеспечивают весь комплекс прочностных требований при улучшении ресурсных характеристик, благодаря чему повышается срок службы, продлеваются межремонтные сроки, уменьшается стоимость эксплуатации, сокращается срок окупаемости проекта.

Для применения железобетонных пролётных строений мостов на ВСЖДМ необходимо выполнить ряд условий:

- устранить недостатки, возникающие в пролётных строениях, связанные со свойствами железобетона как строительного материала;

- повысить качество их изготовления и усовершенствовать технологию производства;

- назначить объективные характеристики материала и конструкции по данным инженерных изысканий и реальных условий эксплуатации;

- использовать современные материалы и технологии, позволяющие улучшить свойства и условия содержания пролётного строения с учётом статической и динамической работы всей конструкции и её отдельных узлов в заданных условиях эксплуатации.

Использование фибробетона как строительного материала в гражданском строительстве изучали разные исследователи, однако его использование в конструкциях транспортных сооружений, в том числе в железобетонных мостах, до настоящего времени обосновано недостаточно. Особо актуально применение фибробетона для дисперсно-армированных конструкций пролётных строений, в которых благодаря разным способам армирования можно улучшить работу конструкции и адаптировать её характеристики к конкретным условиям эксплуатации. Такие исследования до сих пор не проведены, что обуславливает актуальность работы для решения прикладной задачи применения дисперсно-армированных пролётных строений на ВСЖДМ Узбекистана.

Нормирование показателей надёжности моста – сложная инженерная задача для решения даже в рамках одного типа сооружений. Главным образом, это обусловлено сложностью определения критерия отказа из-за многообразия факторов, определяющих надёжность моста, и вариабельностью признаков, характеризующих систему и определяющих возникновение случайных событий. По этой причине многие исследователи устанавливают критерии отказов и нормируют показатели надёжности определённых типов мостов по факторам ресурсной надёжности конструкций и материалов, связанной с отдельными этапами жизненного цикла, а также с условиями эксплуатации [10, 11].

Исследования в области надёжности железобетонных конструкций существенно расширили границы возможного применения железобетонных мостов в сети железных дорог. Большой статистический материал позволяет проанализировать причины появления и развития таких дефектов, определяет возможности совершенствования свойств железобетонных мостовых конструкций и продления сроков их службы в различных условиях эксплуатации.

С марта 2013 г. по октябрь 2015 г. в сети железных дорог с обычным и высокоскоростным режимом эксплуатации в Республике Узбекистан проведено обследование и проанализированы причины возникновения дефектов железобетонных мостов. Установлено, что наиболее частотным типичным дефектом, связанным с условиями работы пролётных строений (85 % случаев), являются трещины. В зависимости от расположения и степени развития в конструкции они снижают грузоподъёмность пролётных строений, их долговечность, приводят конструкцию в неработоспособное состояние. Эти обстоятельства осложняют эксплуатационные характеристики железных дорог, определяя необходимость снижения скорости движения поездов на отдельных участках до 25 км/ч. В сети высокоскоростных дорог развитие трещин носит прогрессирующий характер, что усугубляется

климатическими, сейсмическими воздействиями, характерными для данного региона.

В связи с переходом на высокоскоростное движение вопрос о надёжности железобетонных пролётных строений приобретает чрезвычайную актуальность. Необходимо разработать требования к мостам, обеспечивающие заданные эксплуатационные скоростные режимы железных дорог [8, 9, 12].

Как показывает мировой опыт строительства и эксплуатации ВСЖДМ в аналогичных условиях, использование в конструктивных элементах дисперсного армирования с фиброй позволяет минимизировать образование дефектов от воздействий, в том числе связанных с динамикой от подвижного состава.

Образование трещины в пролётном строении с раскрытием до предельного значения $[\Delta_{cr}]_{np}$ при скоростях движения поезда $V_{max} \leq 300$ км/ч по совокупности случайных событий является по факту отказом конструкции пролётного строения, переводящим его в неработоспособное состояние, что определяет необходимость ограничения эксплуатационной скорости ($V_{эксп}$) движения поездов [4, 5, 7]. При этом отказ конструкции целесообразно устанавливать по максимальной ширине раскрытия трещины Δ_{crfb} , при достижении которой снижается проектная надёжность пролётного строения H_n по функциональным и ресурсным показателям. Тогда критерий отказа примет вид

$$[\Delta_{cr}]_{np} \geq [\Delta_{crfb}],$$

где $[\Delta_{cr}]_{np}$ – предельная ширина раскрытия трещины; Δ_{crfb} – максимальная ширина раскрытия трещины.

$$\Delta_{crfb} \geq \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s \cdot 10^2} \cdot l_s,$$

где φ_1 – коэффициент непродолжительности действия нагрузки; φ_2 – коэффициент периодического профиля арматуры; φ_3 – коэффициент изгибаемых элементов; ψ_s – линейная нагрузка; σ_s – нормальное напряжение; E_s – модуль упругости бетона.

На кафедре «Мосты» ПГУПС совместно с ООО «КИЦ СМТ» проведена научно-исследовательская работа по обоснованию характеристик дисперсно-армированного железобетонного пролётного строения $L = 66$ м под высокоскоростные магистрали в условиях эксплуатации в Республике Узбекистан. В результате математического моделирования установлено, что надёжность таких конструкций связана с вероятностью образования нормальной трещины к оси пролётного строения раскрытием до $\Delta_{crfb} = 0,011$ мм.

Установлено, что использование дисперсно-армированной конструкции позволяет полностью исключить возникновение наклонных трещин, обусловленных действием перерезывающей силы и в два раза сократить максимальную величину раскрытия нормальной трещины Δ_{crfb} по сравнению с предельной величиной раскрытия для обычного преднапряжённого железобетона, регламентированной [1].

Также в ходе исследований на математических моделях были получены эффекты, повышающие конструктивную (H_n) и технологическую (H_c) надёжность конструкции и обуславливающие эффективность применения дисперсно-армированных пролётных строений на высокоскоростных магистралях Республики Узбекистан.

Анализ результатов

1) Уменьшение высоты сжатой зоны пролётного строения X

Устанавливается методами расчёта по первой группе предельных состояний. Во многом обуславливается повышением расчётного сопротивления конструкционного материала пролётного строения и, следовательно, предельного изгибающего момента в случае с дисперсным армированием, соответственно. Так,

$$R_b < R_{bf}, M_f > M,$$

где R_b – расчётное сопротивление бетона; R_{bf} – расчётное сопротивление фибробетона; M_f – предельный изгибающий момент дисперсно-армированной конструкции пролётного строения; M – предельный изгибающий момент железобетонной конструкции пролётного строения.

Схема определения высоты сжатой зоны приведена на рис. 1.

Улучшение прочностных характеристик материала, в том числе расчётного сопротивления фибробетона R_{bf} , позволяет обеспечить эффективные конструктивные и технологические решения.

При разработке конструктивных решений пролётного строения эффект позволяет уменьшить:

- материалоемкость конструкции, обеспечив лучшие технико-экономические показатели пролётного строения;
- толщину стенок коробки дисперсно-армированного пролётного строения до $b = 250$ мм;
- нагрузку от собственного веса конструкции на 15 %;
- расход арматуры и бетона.

Кроме того, эффект позволяет улучшить работу конструкции пролётного строения за счёт повышения прочности зоны плиты пролётного строения при ударных динамических воздействиях от подвижного состава.

2) Повышение трещиностойкости, жесткости, долговечности пролётного строения

Устанавливается методами расчёта по второй группе предельных состояний на образование и ширину раскрытия трещин в конструкции пролётного строения, о чём сказано выше. По мнению авторов, является основным с позиции формирования надёжности дисперсно-армированного пролётного строения. В условиях значительных динамических нагрузок является существенным фактором формирования жёсткости пролётного строения и восприятия сейсмических воздействий. Минимизация процессов, связанных с образованием трещин, обеспечивает ресурсные

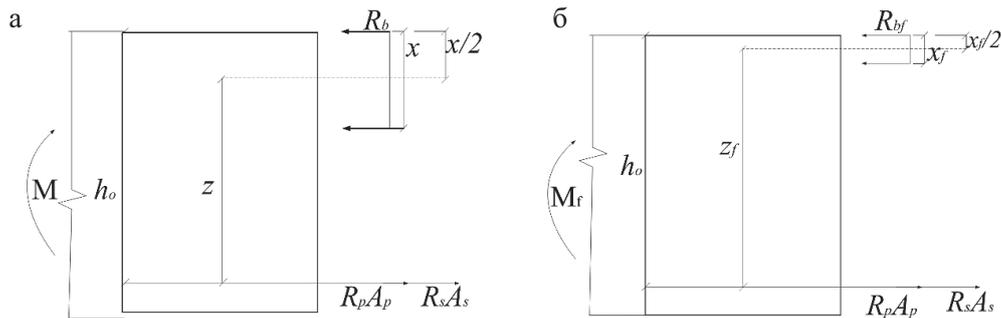


Рис. 1. Схема определения высоты сжатой зоны обычного (а) и дисперсно-армированного (б) бетона

характеристики конструкции, обеспечивающие срок эксплуатации сооружения T_3 .

3) Повышение эксплуатационной надёжности зон передачи сосредоточенных воздействий взамен локального армирования.

К таким участкам относятся места анкерного закрепления продольной высокопрочной арматуры (1, 2), зоны перелома высокопрочной арматуры (3), места анкерного закрепления хомутов, места анкерного закрепления поперечной высокопрочной арматуры (рис. 2).

Использование эффекта при проектировании позволяет:

- усовершенствовать конструкцию узлов передачи сосредоточенных сил;
- повысить технологическую эффективность возведения пролётного строения за счёт сокращения сроков возведения, повышения качества бетонных работ благодаря отсут-

ствию необходимости бетонировать густоармированные элементы.

При обосновании конструктивных решений дисперсно-армированного пролётного строения были выработаны требования к обеспечению надёжности на разных этапах жизненного цикла мостов. Они использовались при разработке нормативного документа «Методика проектирования и строительства, дисперсно-армированного железобетонного пролётного строения под ВСМ в условиях Республики Узбекистан».

Заключение

Решена теоретическая научная задача обоснования надёжности дисперсно-армированных железобетонных конструкций, пред-

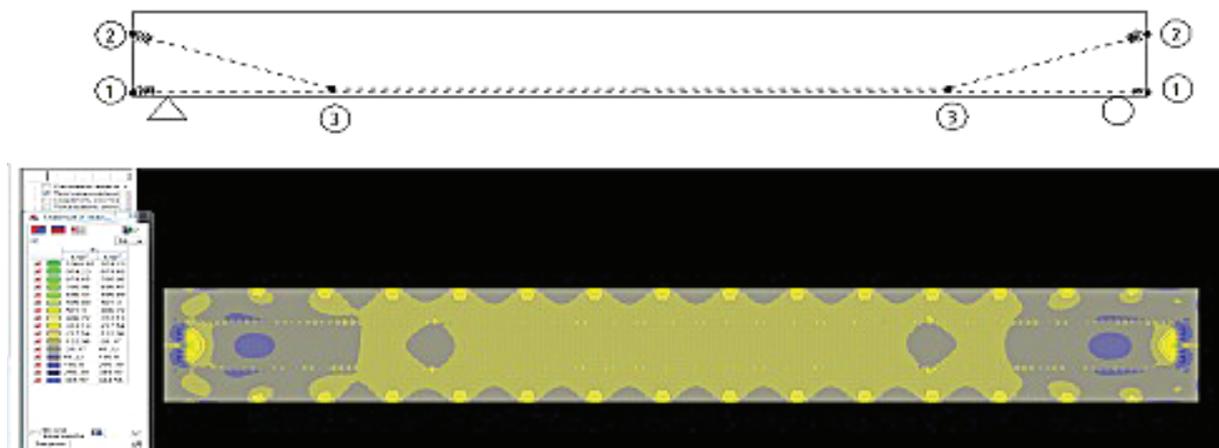


Рис. 2. Схема определения трещин и поля напряжений σ в местах передачи сосредоточенных нагрузок по плите пролётного строения

назначенных для использования на высокоскоростных железнодорожных магистралях в условиях Республики Узбекистан.

Научно-прикладной характер задачи связан с выявлением преимуществ дисперсно-армированных конструкций и с разработкой практических рекомендаций по проектированию и возведению таких конструкций.

Решение задачи позволяет повысить эффективность эксплуатации высокоскоростных магистралей, улучшить ресурсные характеристики пролётных строений железобетонных дисперсно-армированных мостов, повысить их надёжность и долговечность. Продление эксплуатационного ресурса и увеличение межремонтных сроков обеспечит экономическую эффективность таких конструкций по сравнению с конструкциями, не армированными фиброй.

Библиографический список

1. Авиром Л. С. Надёжность сборных зданий и сооружений / Л. С. Авиром. – Л. : Стройиздат, 1971. – 216 с.
2. Бегам Л. Г. Надёжность мостовых переходов через водотоки / Л. Г. Бегам, В. Ш. Цыпин. – М. : Транспорт, 1984. – 252 с.
3. Ермолаев Н. Н. Надёжность оснований сооружений / Н. Н. Ермолаев, В. В. Михеев. – Л. : Стройиздат, 1976. – 152 с.
4. Иосилевский Л. И. Железобетонные пролетные строения мостов индустриального изготовления. Конструирование и методы расчета / Л. И. Иосилевский, А. В. Носарев, В. П. Чирков, О. В. Шепетовский. – М. : Транспорт, 1986. – 216 с.
5. Кудзис А. П. Оценка надёжности железобетонных конструкций / А. П. Кудзис. – Вильнюс : Моклас, 1985. – 156 с.
6. Новак Ю. В. К оценке надёжности метода расчета наклонных сечений железобетонных конструкций / Ю. В. Новак // Надёжность конструкций мостов и тоннелей : сб. науч. трудов МАДИ. – М. : МАДИ, 1986. – С. 23–26.
7. Осипов В. О. Содержание, реконструкция, усиление и ремонт мостов и труб / В. О. Осипов,

Ю. Г. Козьмин, А. А. Кирста и др. ; под ред. В. О. Осипова, Ю. Г. Козьмина. – М. : Транспорт, 1996. – 471 с.

8. Руководство по определению грузоподъёмности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов / МПС. – М. : Транспорт, 1989. – 127 с.

9. Смирнов В. Н. Менеджмент в мостостроении / В. Н. Смирнов, С. В. Чижов ; Институт повышения квалификации и переподготовки. – СПб., 2011. – 42 с.

10. Смирнов В. Н. Особенности высокоскоростного движения железнодорожных экспрессов по мостам / В. Н. Смирнов. – СПб., 2015. – 57 с.

11. СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы». – М. : Госстрой России, 1998. – 214 с.

12. Честной В. М. Железобетонные мосты : температура и надёжность / В. М. Честной. – М. : Транспорт, 1991. – 135 с.

13. Чижов С. В. Надёжность тоннельных обделок из набрызгбетона, сооружаемых в протерозойских глинах : автореф. ... канд. техн. наук / С. В. Чижов. – СПб. : ПГУПС, 1998. – 25 с.

14. Чижов С. В. О требованиях к мостам при высокоскоростном движении / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4. – С. 87–91.

15. ШНК 2.05.03-11* «Мосты и трубы».

References

1. Aviom L. S. Nadezhnost sbornykh zdaniy i sooruzheniy [Reliability of Fabricated Buildings and Structures]. Leningrad, Stroyizdat, 1971. 216 p.
2. Begam L. G. & Tsypin V. Sh. Nadezhnost mostovykh perekhodov cherez vodotoki [Reliability of Bridge Crossings across Waterways]. Moscow, Transport, 1984. 252 p.
3. Yermolayev N. N. & Mikheyev V. V. Nadezhnost osnovaniy sooruzheniy [Reliability of Structure Foundations]. Leningrad, Stroyizdat, 1976. 152 p.
4. Iosilevskiy L. I., Nosarev A. V., Chirkov V. P. & Shepetovskiy O. V. Zhelezobetonnyye proletnyye stroyeniya mostov industrialnogo izgotovleniya.

Konstruivaniye i metody rascheta [Concrete Slab Spans of Industrially-produced Bridges. Designing and Calculation Methods]. Moscow, Transport, 1986. 216 p.

5. Kudzis A. P. Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnykh konstruksiy [Reliability Assessment for Reinforced-concrete Structures]. Vilnius, Mokslas, 1985. 156 p.

6. Novak Yu. V. K otsenke nadezhnosti metoda rascheta naklonnykh sechenij zhelezobetonnykh konstruksij [For Assessing the Reliability of the Method of Calculation of the Inclined Sections of Reinforced Concrete Structures]. *Nadezhnost konstruksiy mostov i tonneley: sbornik nauchnykh trudov MADI (Reliability of Bridge and Tunnel Constructions: Coll. Sci. Papers of MADI)*. Moscow, MADI, 1986. Pp. 23-26.

7. Osipov V. O., Kozmin Yu. G., Kirsta A. A., Karapetov E. S. & Ruzin Yu. G. Soderzhaniye, rekonstruktsiya, usileniye i remont mostov i trub [Maintenance, Reconstruction, Strengthening and Repair of Bridges and Pipes]; ed. V. O. Osipov, Yu. G. Kozmin. Moscow, Transport, 1996. 471 p.

8. Rukovodstvo po opredeleniyu gruzopodyemnosti zhelezobetonnykh proletnykh stroyeniy zheleznodorozhnykh mostov. MPS [Manual for Measuring Bearing

Capacity of Concrete Slab Spans of Railway Bridges]. Moscow, Transport, 1989. 127 p.

9. Smirnov V. N. & Chizhov S. V. Menedzhment v mostostroyenii [Management in Bridge Construction]. St. Petersburg, 2011. 42 p.

10. Smirnov V. N. Osobennosti vysokoskorostnogo dvizheniya zheleznodorozhnykh ekspressov po mostam [Specific Features of High-speed Movement of Express Trains across Bridges]. St. Petersburg, 2015. 57 p.

11. SNiP 2.05.03-84 Mosty i truby [Bridges and Pipes]. Moscow, Gosstroy Rossii, 1998. 214 p.

12. Chestnoy V. M. Zhelezobetonnyye mosty: temperatura i nadezhnost [Railway Bridges: Temperature and Reliability]. Moscow, Transport, 1991. 135 p.

13. Chizhov S. V. Nadezhnost tonnelnykh obdelok iz nabryzgbetona, sooruzhayemykh v proterozoysskikh glinakh [Reliability of Shotcrete Tunnel Linings Built in Proterozoic Clays]. St Petersburg, PGUPS, 1998. 25 p.

14. Chizhov S. V. & Yakhshiyev E. T. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 4, pp. 87-91.

15. ShNK 2.05.03-11* Mosty i truby [Bridges and pipes].

ЧИЖОВ Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, sergchizh@yandex.ru; ПРОКОПОВИЧ Владимир Степанович – доцент, pvs@spbsmt.ru; *ЯХШИЕВ Элбек Толипович – аспирант, elbek-8420@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).