

УДК 624.021

А. В. Бенин, Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА МОСТОВ
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ
«МОСКВА – КАЗАНЬ»**

Дата поступления: 22.09.2015

Решение о публикации: 22.09.2015

Цель: Разработать специальные технические условия (СТУ) на проектирование и строительство инфраструктуры высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань для создания актуального нормативного документа по проектированию мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях. **Методы:** Применялся всесторонний анализ отечественных разработок, а также зарубежный опыт проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ), в основном европейские и китайские нормативные документы. **Результаты:** Сформулированы требования к искусственным сооружениям на ВСМ, которые обуславливают возникновение научно-исследовательских задач, связанных с динамическим характером работы пролётных строений мостов, с аэродинамическим взаимодействием подвижного состава и конструкций мостов, а также с совместной работой пролётных строений и бесстыкового пути. Определена расчётная нагрузка от подвижного состава высокоскоростных поездов, контейнерных поездов и «тяжёлых» поездов обслуживания. **Практическая значимость:** Разработанные СТУ жёстко нормируют параметры, которые обеспечивают безопасность движения высокоскоростных поездов и надёжность мостов на протяжении всего срока эксплуатации. Это позволит обеспечить комфорт пассажиров при движении поездов по мостам. Следует отметить, что при разработке СТУ были использованы последние достижения в области отечественного и зарубежного проектирования и строительства мостов, а многие требования и параметры впервые использованы в отечественной практике проектирования.

Высокоскоростная железнодорожная магистраль, искусственные сооружения, параметры мостов

Andrey V. Benin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, laboratory head, kpmk@pgups.edu; ***Leonid K. Dyachenko**, teaching assistant, leonid_dyachenko@mail.ru; **Vladimir N. Smirnov**, D. Eng., professor, department chairman (Petersburg State Transport University) SPECIFIC FEATURES IN DESIGNING AND BUILDING THE BRIDGES OF THE MOSCOW TO KAZAN HIGH-SPEED LONG-DISTANCE RAILWAY LINE

Objective: To develop project-specific design codes (PSDC) for designing and building the infrastructure of the Moscow to Kazan high-speed long-distance railway line in order to create an up-to-date regulatory document for designing bridges on high-speed long-distance railway lines. **Methods:** Comprehensive analysis of domestic designs was conducted, as well as that of international experience in designing, building and operating high-speed long-distance railways, primarily reflected in European and Chinese regulatory documents. **Results:** The paper formulates requirements for engineering structures on high-speed long-distance railway lines which cause the appearance of scientific-research tasks related to

dynamic character of operation of bridge superstructure, to aerodynamic interaction between rolling stock and bridge structures, and to combined action of bridge superstructure and continuous welded rail track. Design limit loads for rolling stock of high-speed trains, container trains and “heavy” maintenance trains were calculated. **Practical importance:** The PSDC developed rigidly standardize the parameters which ensure safety of high-speed trains’ movement and bridges’ robustness throughout the service life. This may ensure passengers’ comfort whilst travelling over bridges. It has to be noted that in development of the PSDC, the latest achievements in domestic and international bridge design and construction were used, and many requirements and parameters were used in domestic designing practice for the first time.

High-speed long-distance railway line, engineering structures, bridge parameters.

Необходимость разработки специальных технических условий (СТУ) «Сооружения искусственные участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали (ВСМ) Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству» вызвана отсутствием российских нормативных документов, регламентирующих требования к проектированию и строительству искусственных сооружений (мостов, виадуков, путепроводов, эстакад, водопропускных труб) для движения высокоскоростных пассажирских экспрессов со скоростью до 400 км/ч. При разработке СТУ использовались как действующие нормативные и директивные документы в области высокоскоростного железнодорожного транспорта, так и европейские нормативные документы.

Особенности проектирования мостов на ВСМ

По данным ОАО «Ленгипротранс», на ВСМ Москва – Казань требуется построить 1180 искусственных сооружений, в том числе 5 внеклассных, 48 больших и 80 средних мостов [1].

В качестве временной подвижной нагрузки при рельсовой колее 1520 мм предполагаются следующие типы подвижного состава:

- высокоскоростные поезда со скоростями ≤ 350 км/ч;
- пассажирские поезда со скоростями ≤ 200 км/ч;

- контейнерные поезда со скоростями ≤ 160 км/ч;
- поезда обслуживания на скоростях движения ≤ 90 км/ч.

Важнейшим указанием СТУ является положение о приоритетности высокоскоростного движения, основной целевой задачей реализации проекта – пропуск высокоскоростных поездов. Пропуск всех других поездов (пассажирских, контейнерных и хозяйственных поездов для обслуживания инфраструктуры) возможен только в том случае, если это не снижает безопасности движения высокоскоростных поездов, не изменяет скоростной режим и не вызывает значимого удорожания строительства и (или) содержания. Стоит отметить, что пропуск пассажирских или контейнерных поездов одновременно с высокоскоростным поездом (по встречному направлению) возможен только в том случае, если уровни напряжений и деформаций в элементах сооружения и элементах пути при прохождении этих поездов не превышают соответствующих значений для прохода двух высокоскоростных поездов. Появление тяжелых поездов обслуживания на участке магистрали возможно только если на том же участке отсутствует высокоскоростной поезд.

За расчетную временную высокоскоростную нагрузку приняты 22 поезда (22 схемы нагрузок), представляющие собой реальные высокоскоростные поезда:

- 10 универсальных поездов (аналог HSLM A1-A10 Eurocodes [4]);
- 7 реальных европейских поездов (аналог RT Eurocodes [4]);

• 5 российских поездов (Эр-200 и варианты «Сапсан»).

Для пропуска по сооружению поездов со скоростью до 200 км/ч (пассажирского, контейнерного или поезда обслуживания) временную нагрузку следует принять по СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» как нагрузку СК при классе нагрузки $K = 11$. Класс нагрузки обоснован из условия, что усилия и напряжения в элементах конструкций от загрузки одного пути нагрузкой СК не превышает соответствующих значений при загрузке двух путей на мосту временной высокоскоростной нагрузкой (с учетом динамического воздействия). При этом конструкции всех мостовых сооружений необходимо проверить расчетом на возможный пропуск по ним монтажных агрегатов.

Особое внимание в СТУ уделяется обеспечению высокой жесткости пролетных строений – как вертикальной, так и горизонтальной и крутильной. Нормируются величины допустимых прогибов, углов перелома профиля

и смещения верха опор на мостах ВСМ при скорости до 350 км/ч (см. таблицу).

При проектировании мостов необходимо уделять особое внимание динамическим расчетам мостовых конструкций, в том числе контролю резонансных явлений, а также влиянию дефектов колес и рельсов. Особенность силового воздействия подвижного состава на мостовые конструкции связана с так называемым эффектом скорости, или кинематическим возбуждением. Суть указанного режима взаимодействия моста и поезда состоит в передаче на пролетные строения экипажами поездов через колесные пары переменного силового воздействия вследствие перемещения временной нагрузки по мосту. Опасные резонансные колебания мостовых конструкций возникают тогда, когда период силового воздействия поезда совпадает с периодом собственных колебаний загруженного поездом пролетного строения, при этом значение динамического коэффициента к временной нагрузке от подвижного состава значительно возрастает.

Предельные значения упругих прогибов, смещений и углов поворота

Нормативные требования	Предельные значения высокоскоростных поездов
Максимальные прогибы ¹⁾	При скорости 350 км/ч $\delta \leq 1/1500 L$ при $L \leq 27$ м $\delta \leq 1/2600 L$ при $L = 65$ м $\delta \leq 1/2000 L$ при $L \geq 100$ м при скорости 200 км/ч $\delta \leq 1/1000 L$ при $L \leq 15$ м $\delta \leq 1/1500 L$ при $L = 38$ м $\delta \leq 1/600 L$ при $L \geq 90$ м ²⁾
Углы перелома профиля ¹⁾	$\Theta \leq 1,5 \%$
Переломы оси пути в плане ³⁾	$\Theta \leq 1,0 \%$
Смещения верха опор ³⁾	$\delta x, \delta y \leq 1/800 L$
Горизонтальный прогиб пролетных строений ⁴⁾	$\delta y \leq 1/5000 L$
Скручивание пути на пролетном строении (изменение перепада отметок рельсов) ¹⁾	$\Theta \leq 1$ мм на 3 м пути

Примечания. ¹⁾ От вертикальной подвижной нагрузки. ²⁾ Промежуточные значения – по интерполяции. ³⁾ От центробежной силы (горизонтальных ударов), ветра, льда и температуры. ⁴⁾ На уровне ездового полотна; от ветровой нагрузки и поперечных ударов с одного пути и от неравномерного нагрева поясов ферм ($dT = 15$ °C).

Следует отметить, что именно динамические расчеты являются ключевыми при проектировании мостов на ВСМ. По результатам динамических расчётов назначаются основные размеры, параметры и динамические характеристики пролетных строений. Рациональное проектирование позволяет избежать чрезмерных неблагоприятных динамических реакций конструкции в период эксплуатации, а также обеспечить безопасность движения высокоскоростных поездов и надежность работы сооружения.

Для расчетов плитных, коробчатых и ребристых разрезных балок пролетом до 60 м динамическое воздействие может быть представлено в виде набора сосредоточенных сил, перемещающихся по мосту с заданной скоростью. Для решетчатых, арочных и рамных конструкций динамический расчет производится с учетом взаимодействия поезда и мостового сооружения.

В целях обеспечения стабильности мостового полотна, гарантирующей устойчивость рельсового пути как требование безопасности железнодорожного движения, на мостах ВСМ ограничиваются максимальные вертикальные пиковые ускорения пролетного строения на уровне верхнего строения пути [4]:

- при устройстве пути на балласте – $0,35 \text{ g м/с}^2$;
- при жестком основании (безбалластном пути) – $0,50 \text{ g м/с}^2$.

При динамическом расчете системы «мост – поезд» ускорения на уровне расположения пассажиров в вагоне для обеспечения комфортабельности проезда не должны превышать:

- вертикальные – $0,15 \text{ g м/с}^2$;
- горизонтальные – $0,1 \text{ g м/с}^2$.

При проектировании большепролетных сооружений учитывают вопросы аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда и элементов конструкций, а также ветровое воздействие.

Для малых и средних мостов следует применять унифицированные конструктивные и технологические решения, специально

разработанные на начальной стадии проектирования. Оптимальные конструктивные решения унифицированной серии пролетных строений должны разрабатываться с учетом результатов динамических расчетов на нагрузку от высокоскоростных поездов в зависимости от типа верхнего строения пути на проектируемом участке магистрали и основываться на технико-экономическом сравнении вариантов. Индивидуальное проектирование допустимо при разработке проектов больших и внеклассных мостов, мостов больших пролетов, при расположении мостов на участках со сложным продольным профилем, а также в иных обоснованных случаях.

Анализ зарубежного опыта проектирования мостов на ВСМ и наработок отечественных проектировщиков показывает целесообразность следующих конструктивно-технологических решений:

- для малых мостов, путепроводов и эстакад с пролетами до 15 м – сборные плитные и ребристые разрезные балочные пролетные строения;
- для многопролетных балочных мостовых сооружений эстакадного типа с пролетами 15–33 м – плитно-ребристые пролетные строения из монолитного преднапряженного железобетона;
- для мостов с пролетами 33–55 м – коробчатые пролетные строения из монолитного преднапряженного железобетона. При этом для неразрезных систем целесообразно использовать метод циклической продольной надвижки;
- в мостах с пролетами более 55 м – металлические двухпутные пролетные строения со сквозными главными фермами или арочные системы при массивных бетонных и железобетонных опорах.

В соответствии с требованиями СТУ на мостах используется только бесстыковой путь, чем достигается снижение динамического воздействия подвижного состава на мост, уменьшение шума и вибрации элементов. Однако работа бесстыкового пути на мосту суще-

ственно отличается от работы на земляном полотне в вязи с деформативностью моста при изменениях температуры воздуха и при поездных вертикальных и горизонтальных воздействиях. В связи с этим в рельсах, являющихся элементами единой системы «мост – бесстыковой путь», возникают дополнительные усилия. Их величина зависит, в частности, от типа мостового полотна. Поскольку в зарубежной практике используется как балластное, так и безбалластное мостовое полотно, в СТУ допускается применение обоих решений (при обязательном расчёте усилий в элементах системы «мост – бесстыковой путь» под действием температурных и поездных воздействий). Положение и тип уравнильных приборов следует определять в соответствии с результатами исследования взаимодействия системы «мост – бесстыковой путь» индивидуально для каждого проекта моста [2, 3].

При высокоскоростном движении поездов важно обеспечить плавность проезда в зоне перехода от насыпи подхода к мосту. Для этого рекомендуется постепенно увеличивать жесткость земляного полотна с помощью переходных участков (участков переменной жесткости) с применением, например, фракционированного щебня с проливкой его цементным раствором, армирования грунта или других решений.

Параметры мостов на ВСМ:

- 1) двухпутные пролётные строения. Расстояние между осями путей 5000 мм;
- 2) участки переменной жёсткости на подходах к мосту – не менее 50 м с каждой стороны;
- 3) минимальные радиусы вертикальных кривых 42 000 м. При безбалластном мостовом полотне и пролете более 33 м размещение сооружения на вертикальной кривой не допускается;
- 4) минимальные радиусы кривых в плане 10 000 м;
- 5) максимальный уклон на мосту 24‰;
- 6) мостовое полотно безбалластное на железобетонных плитах и на балласте при его толщине под шпалой 40 см;

7) на железобетонных мостах с ездой на балласте с пролетными строениями длиной до 33 м бесстыковой путь укладывается без ограничения суммарной длины пролетных строений. При безбалластном мостовом полотне бесстыковой путь укладывается по индивидуальному проекту;

8) на металлических многопролётных мостах с ортотропной плитой и с ездой на балласте с пролётами до 55 м суммарная длина непрерывного бесстыкового пути допускается не более 220 м. На однопролётном металлическом мосту непрерывный путь допускается при длине пролёта до 55 м.

Заключение

Возведение мостов, эстакад, путепроводов и других искусственных сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях ставит перед учёными, проектировщиками, строителями и эксплуатирующими организациями сложные задачи, решение которых определяется участием широкого круга специалистов с использованием мирового опыта и результатов экспериментальной проверки в условиях, максимально приближенных к реальным.

Библиографический список

1. Петров А. П. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. П. Петров // Новые технологии в мостостроении : мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях : сб. трудов / под ред. В. Н. Смирнова. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 8–12.
2. Смирнов В. Н. Динамическая работа мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей при продольных воздействиях поездной нагрузки : моногр. / В. Н. Смирнов. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – 65 с.
3. Смирнов В. Н. Расчёт мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей на продольные

силы : моногр. / В. Н. Смирнов. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – 65 с.

4. EN 1991-2 (2003) : Eurocode 1 : Actions on structures. P. 2 : Traffic loads on bridges.

References

1. Petrov A. P. Osobennosti proyektirovaniya mostov na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh [Specific Features of Designing Bridges on High-Speed Long-Distance Railway Lines]. *Novyye tekhnologii v mostostroyenii: mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh: sbornik trudov (New Technologies in Bridge Engineering: Bridges on High-Speed Long-Distance Railways: Collection of*

Papers), ed. by V. N. Smirnov. St. Petersburg, Petersburg State Transp. Univ., 2013. Pp. 8-12.

2. Smirnov V. N. Dinamicheskaya rabota mostov vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistraly pri prodolnykh vozdeystviyakh poyezdnoy nagruзки: monografiya [Dynamic Operation of High-Speed Long-Distance Railway Lines' Bridges for Linear Impact of Train Stress Load: Monograph]. St. Petersburg, Petersburg State Transp. Univ., 2013. 65 p.

3. Smirnov V. N. Raschet mostov vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistraly na prodolnyye sily: monografiya [Axial Force Calculations for High-Speed Long-Distance Railway Lines' Bridges: Monograph]. St. Petersburg, Petersburg State Transp. Univ., 2013. 65 p.

4. EN 1991-2 (2003): Eurocode 1: Actions on structures. P. 2: Traffic loads on bridges.

БЕНИН Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, kpmk@pgups.edu; *ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович – ассистент, leonid_dyachenko@mail.ru; СМИРНОВ Владимир Николаевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).