
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21/8

М. И. КАЗАКЕВИЧ*

* Каф. «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. 49 (211) 495 36 17, эл. почта mkazak@rambler.ru

СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА СРЕДНЕ- И ДЛИННОПРОЛЕТНЫХ МОСТОВ НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ (HSR) КИТАЯ

Цель. Обзор методов проектирования и строительства железнодорожных мостов средних и больших пролетов на высокоскоростных магистралях Китая. **Методика.** Для достижения поставленной цели изучен опыт проектирования и строительства средне и длиннопролетных мостов на высокоскоростных железных дорогах Китая. **Результаты.** Анализ традиционных и современных подходов к проектированию мостов на высокоскоростных магистралях железных дорог Китая и разработка современных требований к проектированию таких мостов. **Научная новизна.** Предлагаются новые, высокоэффективные подходы к разработке проектов железнодорожных мостов на высокоскоростных магистралях. **Практическая значимость.** Применение полученных результатов к расчетам и проектированию мостов на высокоскоростных магистралях железных дорог Китая.

Ключевые слова: среднепролетные мосты; длиннопролетные мосты; мосты Китая; жесткая рама; гибкая арка; деформация балки

Введение

Данный обзор подготовлен на основе обширного материала, преимущественно, на китайском языке и потому труднодоступного для детального изучения. Тем не менее, вашему вниманию предлагается научный материал, посвященный:

- условной классификации мостов на высокоскоростных железных дорогах HSR Китая, построенных за последние 7-10 лет;

- масштабным научным, техническим и технологическим проблемам, которые решались, решены и сформулированы для дальнейших решений при эволюционном переходе от средних длин пролетов (100...200 м) к большим длинам (200...500 м) и от скоростей движения поездов 200...250 км/час к скоростям 350 км/час и выше.

Цель

Проектированию мостов на линиях HSR предшествуют масштабные изыскания, исследования специфических особенностей:

- выбор створа мостового перехода;

- анализ данных многолетних наблюдений климатических (ветер, снег, гололёд, температурные режимы), сейсмических и волновых (при пересечении водоёмов любого типа) нагрузок и воздействий.

Большой спектр научных исследований выполнялся по заданию Министерства железных дорог Китая в крупнейших научных центрах не только китайских, но и американских (Калифорнийский, Мичиганский и др.) университетов.

Привлечение университетов Китая и, в первую очередь, США объясняется традиционной ролью университетской науки в западных странах в развитии наук всех направлений.

HSR в Китае состоят из старых, но подвергшихся реконструкции линий со скоростью движения 200...250 км/час и вновь построенных линий со скоростью ~ 350 км/час. На данный момент все это составляет 9356 км – новых линий и 3209 км – реконструированных линий.

К 2020 году общая длина HSR в Китае превысит 20 000 км. Это будет полная сеть железных дорог, которая соединит все провинциальные центры и все большие города Китая с населением свыше 5 млн. человек.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Большинство мостов имеют стандартизированные балки с пролетами 24, 32 и 40 м и только сравнительно немного мостов имеют неразрезные балки от 48 до 100 м. Например, 90 % мостов в секторе Пекин – Шанхай имеют мосты с пролетами стандартными (24, 32 и 40 м) и 5 % – с неразрезными балками, а ещё 5 % – с длинопролетными балками.

Хотя мосты на HSR Китая со средними и длинными пролётами составляют небольшую часть, они играют ключевую роль в завершении всей сети HSR Китая, т. к. они преодолевают такие физические препятствия, как уже существующие линии HSR, автобан, реки и т. д.

Средние и длинопролетные мосты на линиях HSR можно разделить на две категории по длине главного пролёта, которые уже были

выше приведены: средний пролет (100...200 м) и длинный пролет (200...500 м).

Во вторую категорию включены также несколько вантово-балочных мостов с главным пролетом свыше 500 м.

Висячие мосты до настоящего времени ещё не использовались на линиях HSR в Китае, поскольку они слишком гибкие, чтобы обеспечить жёсткие эксплуатационные требования.

Тем не менее, в настоящий момент в Китае проводятся исследования по возможности использования висячих мостов на линиях HSR.

В предлагаемом Вашему вниманию обзоре содержатся: ключевая философия проектирования мостов; основные параметры конструкций и методы строительства (табл. 1).

Таблица 1

Recent completed medium length special span in the HSR of China

Structural type	Bridge name	Main span (m)	HSR segment	Built
Tied steel arch	East Lake	112	Wuhan-Guangzhou	2008
	Hujiawan	112	Wuhan-Guangzhou	2008
	Liangjiawan	112	Wuhan-Guangzhou	2008
	Tingsihe	140	Wuhan-Guangzhou	2008
	Yandangshan	2×90	Ningbo- Wenzhou	2009
	Mulanxi	128	Fuzhou-Xiamen	2009
	Xinkaihe	138	Harbin-Dalian	2012
Rigid frame	Tianluo	160	Wenzhou-Fuzhou	2008
	Baimahe	3×145	Wenzhou-Fuzhou	2008
	Liuxihe	168	Wuhan- Guangzhou	2009
	Zinihe	2×168	Guangzhou-Shenzhen	2010
Hybrid steel arch with concrete girder	Kunyang	136	Wenzhou- Fuzhou	2007
	Yichang Yangzte	2×275	Yichang-Wanzhou	2008
	Shawan Channel	160	Guangzhou-Shenzhen	2009
	Liugangyong	160	Guangzhou-Hong	2010
	Xiaolan Channel	220	Kong Guangzhou-Zhuhai	2010
	Zhenjiang Channel	180	Beijing-Shanghai	2010
	Xianyang West	136	Xi'an-Baoji	2012
	Songhuajiang Channel	3×156.8	Harbin- Qiqihar	2013

Методика

Для мостов со средними пролётами (100...200 м) рассматриваются три типа:

- стальная гибкая арка с жёсткой затяжкой (рис. 1);
- жесткая рама (рис. 2);

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

– гибридная система «стальная арка с бетонной балкой» (рис. 3).

Для мостов с длинными пролётами (200...500 м и более) – три таких типа (табл. 2):

– ферменная арка (рис. 4);

– вантово-балочная ферменная балка (рис. 5);

– бетонная арка.



(a) Hujawan Bridge



(b) Tingsihe Bridge



(c) Yandangshan Bridge



(d) Xinkaihe Bridge

Рис. 1. Мосты типа «Стальная гибкая арка с жесткой затяжкой»



(a) Tianluo Bridge

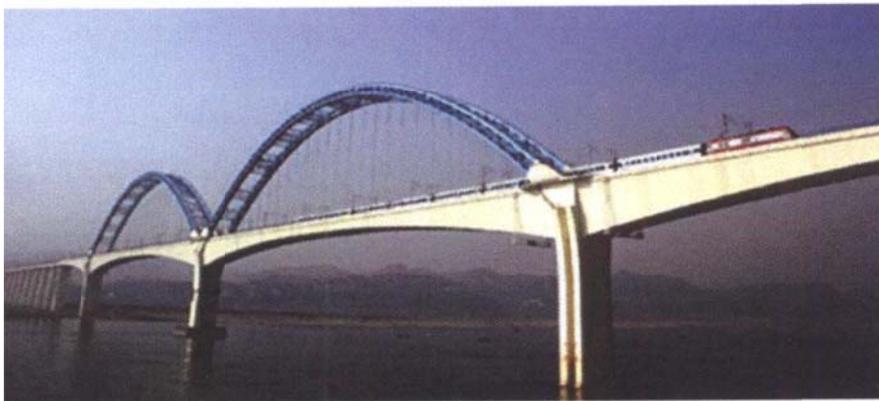


(b) Liuxihe Bridge

Рис. 2. Мосты типа «Жесткая рама»



(a) Kuyang Bridge



(b) Yichang Yangtze Bridge

Рис. 3. Мости типа «Стальная арка с бетонной балкой»

Таблица 2

Recent completed and ongoing long-span bridges in the HSR of China

Structural type	Bridge name	Main span (m)	HSR segment	Built
Truss arch	Dongping	242	Beijing-Guangzhou	2009
	Dashengguan	2×336	Beijing-Shanghai	2011
	Minjiang	198	Fuzhou-Xiamen	2011
Cable-stayed with truss girder	Tianxingzhou	504	Beijing-Guangzhou	2008
	Zhengzhou Yellow River	5×168	Beijing-Guangzhou	2010
	Yujiang	228	Nanjing-Guangzhou	2011
	Tongling Yangtze	630	Hefei- Fuzhou	2013
	Anqing Yangtze	580	Nanjing-Anqing	2014 (expected)
	Huanggang Yangtze	567	Wuhan- Huanggang	2014(expected)
Concrete arch	Beipanjiang	445	Shanghai -Kunming	2015(expected)



(a) Dongping Bridge



(b) Dashengguan Bridge



Рис. 4. Мости типа «Ферменная арка»

Один из краеугольных вопросов для мостов на линиях HSR – контроль деформаций (перемещений).

Чтобы обеспечить гладкость колеи, HSR предъявляют очень высокие требования к допустимым деформациям. Независимо от выбранной конструктивной формы длинного пролёта, контроль за перемещениями, деформациями главной балки являются ключевым моментом, поскольку скорость движения поездов превышает 250 км/час [1]. Порог требований на мостах без балласта выше, чем на мостах с балластным покрытием, т.к. обеспечить плавность хода на пути без балласта очень трудно.

Таким образом, все длиннопролетные мосты на линиях HSR в Китае используют проездной путь с балластом.

Тем не менее, в Китае не существует общих детальных рекомендаций для длиннопролетных мостов, поскольку проектирование и анализ динамического поведения осуществляются индивидуально, хотя, по крайней мере, допустимые отклонения (деформации) должны соответствовать среднепролетным мостам.

Существует четыре основных положения (критериев) контроля:

1. вертикальные отклонения балки должны быть меньше 2,0 мм;
2. кручение торцов балки должны быть меньше 0,4 %;
3. длительные отклонения (например, при ползучести бетона) должны быть меньше $L/1000$ (мм); L – в мм;
4. продольные перемещения фундаментов.



(a) Tianxingzhou Bridge



(b) Yujiang Bridge



(c) Zhengzhou Bridge

Рис. 5. Мости типа «Вантово-балочная ферменная балка»

Все эти четыре требования необходимо неукоснительно соблюдать для обеспечения плавности хода и безопасности движения поездов.

Устойчивость колеи и плавность движения поездов на HSR в сильной степени зависят от контроля вертикальных и поперечных отклонений главной балки в процессе эксплуатации.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Проектная спецификация Министерства железных дорог Китая имеет вполне определённый набор требований для кратковременных и длительных отклонений, но только для коротких балок [2]:

- вертикальные отклонения должны быть меньше $1,1 L/1000$;
- поперечные отклонения должны быть меньше $L/4000$;
- кручение торцов балки должны быть для балластного пути меньше $0,2 \%$ и для безбалластного пути – $0,1 \%$.

Для длинных пролётов таких рекомендаций по техническим требованиям нет, так же, как их нет и для неразрезных балок средней длины, арочных мостов и вантово-балочных мостов. Их динамическое поведение, деформации должны изучаться во взаимодействии с подвижной нагрузкой с учётом результатов изысканий и исследований перечисленных выше специфических особенностей, чтобы вырабатывать индивидуальные требования и рекомендации для длиннопролётных мостов.

В связи с более высокими требованиями по обслуживанию этих мостов по сравнению с обычными железнодорожными мостами, тщательно изучались технические разработки, связанные с динамической реакцией мостов на линиях HSR, особенно те, которые связаны с сейсмостойкостью, взаимодействием «рельсовый путь – конструкции моста», эффект ползучести бетона, температурные воздействия и т.д. [3-8].

При развитии строительства мостов на линиях HSR в Китае учитывались такие специфические разработки, как температурные расширения, сейсмические и ветровые воздействия, действие ползучести. Понадобились также дополнительные исследования в случае сложных нагрузок, которые могут вызвать значительные отклонения.

Каждая балка с длиной пролёта более 100 м требует особых мер для контроля температурных расширений и укорочений при остывании рельса, т.к. в этом случае непрерывные сварные рельсы могут разрушиться в жаркую погоду и вызвать сход поезда с рельсового пути.

В многопролётных мостах HSR широко используются стопоры и противоугоны специальной конструкции.

Проанализированы многочисленные комбинации механизмов расширения вантово-балочных мостов.

Было установлено, что оптимальным способом контролировать температурные воздействия на рельсовый путь является применение небольших стопоров в определённых точках вдоль главной балки и больших механизмов стабилизации расширения на обоих торцах балки [9,10].

Численный анализ однопилонного вантово-балочного моста длиной 112 м показал, что продольное перемещение и уровень напряжений рельса можно значительно снизить, используя регулятор расширения в зоне стыка пилона и балки.

Основанные на существующих конструкциях мостов требования к возможности противостоять сейсмической опасности лишь упоминаются в HSR Норм Китая. Но это общие положения, которые относятся только к мостам с малыми пролётами, т.е. менее 48 м.

Сейсмическое проектирование и анализ поведения длиннопролётных мостов HSR в Китае остаются всё ещё случайными, т.е. производятся для каждого моста индивидуально, а общей методологии, общего подхода нет.

На большинстве длиннопролётных мостов HSR устанавливаются гасители вдоль продольной оси моста, чтобы снизить очень большую динамическую реакцию на сейсмическое воздействие и чрезвычайное торможение поезда.

Подобно сейсмическому проектированию анализ аэродинамического воздействия длиннопролётных мостов также производится индивидуально. Но в большинстве случаев длиннопролётные мосты в Китае в процессе проектирования обязательно подвергаются динамическому анализу наряду с полномасштабными испытаниями моделей в аэродинамической трубе.

Таким образом, на деформации главной балки влияют скорость поезда и скорость ветра.

Испытания моделей в аэродинамической трубе спаренной балки, соединённой поперечной балкой позволили определить оптимальное соотношение «высота – ширина» для улучшения аэродинамических качеств такой конструктивной формы [11-13].

Длительные деформации ползучести могут вызвать возникновение неровностей поверхности рельса, что является явной угрозой для безопасности поездов на линиях HSR.

Все средние – и длиннопролётные мосты на HSR в Китае используют балластный рельсо-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

вый путь, где действие ползучести легче контролировать, регулировать, чем при безбалластном покрытии.

С точки зрения строительного проектирования действие ползучести регулируется с помощью увеличения высоты балки и снижения разности напряжений между верхними и нижними волокнами балки при комбинации длительных нагрузок.

Кроме того, чтобы снизить динамическое поведение балки, скорость поезда приходится ограничивать до 250 км/час.

Выводы

В заключение, обобщая отмеченные выше проблемы, можно указать три наиболее важные аспекта в проектировании мостов на линиях HSR в Китае в будущем, в т. ч. ближайшем.

1. обеспечение вертикальной жёсткости;
2. кручение торцов балки;
3. продольная жёсткость мостов.

В Китае современная система мониторинга больших мостов не располагает достаточно репрезентативной информацией по деформациям мостов и рельсового пути, но такие исследования целенаправленно уже проводятся с использованием оптимального расположения сенсоров, различных систем мониторинга и, что особенно важно, быстрой диагностики опасностей.

Дальнейшее развитие HSR в Китае связывают с новыми специальными пролётами в будущем, которые зависят от социальных потребностей, конкурса проектов, новых концепций и экспериментов.

В Китае планируются длиннопролётные мосты, основанные на новой технике и тщательных предварительных исследованиях [14-16].

Например, изучается перспектива вантового – балочного моста с главным пролётом 1092 м через р. Янцзы как часть линии Нантонг – Шанхай, на котором будут и HSR и автобан [16].

Кроме того, сейчас проводится предварительное изучение возможности висячих мостов на линиях HSR, таких как мост Янчжоу через р. Янцзы с главным пролётом 1120 м и мост через пролив Кьёгчжоу с главным пролётом 1408 м.

На этой оптимистической для мирового мостостроения ноте я завершаю свой обзор.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chen, L. J. Development and practice of large – span bridges on China HSR [Text] / L. J. Chen, J. Qiao // Rail Econ. Res., 2010. – v. 98, – pp. 46-50 (in Chinese).
2. Ministry Railways of China. Code for Design of High Speed Railway, TB 10621-2009 [Text]. – China Railway Press; 2009 (in Chinese).
3. Yi, L. X. Engineering characteristic and key technique of Dashenguan Changjiang river bridge [Text] / L. X. Yi // Steel Constr., 2007. – v. 22. – pp. 78-80 (in Chinese).
4. Fryba, L. A rough assessment of railway bridges for high speed trains [Text] / L. A. Fryba // Eng. Struct.; 2001. – v. 23. – pp. 548-556.
5. Raghunathan, R. S. Aerodynamics of high-speed railway train [Text] / R. S. Raghunathan, H. D. Kim, T. Setoguchi // Prog. Aerospace Sci.; 2002. – v. 38. – pp. 469-514.
6. Dias, R. A study of the lateral dynamic behaviour of high speed railway viaducts and its effect on vehicle ride comfort and stability [Text] / R. Dias, J. M. Goicolea Ruigómez, F. Gabaldon Castillo, M. Cuadrado Sanguino, J. Nasarre, P. Gonzalez Requejo. – 2008.
7. Calcada, R. Track-bridge interaction on high-speed railways [Text] / R. Calcada, R. Delgado, A. Campos a Matos, J. M. Goicolea, F. Gabaldon. – Portugal; 2007. – pp. 15-66.
8. Kumar, Rakesh Effect of temperature gradient on track-bridge interaction [Text] / Rakesh Kumar, Akhil Upadhyay // Interact. Multiscale Mech., 2012. –v. 5(1). – pp. 1-12.
9. Xu, Y. Bridge overall design by siyuan survey on Wuhan – Guangzhou high-speed railway [Text] / Y. Xu, F. H. Jin, F. T. Yand, S. M. Cai // Rail. Stand Des., 2010. – v. 1. – pp. 94-99 (in Chines).
10. Zhu, B. Design of continuous welded rail upon long span cable – stayed bridge with steel – concrete composite box beam [Text] / B. Zhu // Rail. Stand Des., 2012. – v.2. – pp. 4-15 (in Chinese).
11. Li, Y. Dynamics of wind – rail vehicle-bridge systems [Text] / Y. Li, S. Qiang, H. Liao, Y. Xu // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2005. – v. 93. – pp. 483-507.
12. Wang, S. Nonlinear coupling vibration analysis of wind load-train-long-span bridge system [Text] / S. Q. Wang, H. Xia, W. W. Guo, X. T. Du // J Beijing Jiaotong Univ., 2012. – v. 36. – pp. 36-46 (in Chinese).
13. Li, Y. Study on vibration rules of longitudinal force of continuous welded rails on long-span cable – stayed bridge [Text] / Y. Li // J. Rail. Eng. Soc., 2012. – v. 169. – pp. 42-46 (in Chinese).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

14. Lio, J. O. Ma W.F. Construction monitoring and control of Liuxihe bridge [Text] / J. O. Ma W.F. Lio, W. F. Wang // Sei. Technol. Eng., 2011. – v. 15 (in Chinese).
15. Xiao, H. Z. Design of Anqing Changjiang river railway bridge [Text] / H. Z. Xiao, W. Xu, Z. Y. Gao // Bridge Constr., 200. – v. 5 – pp. 6-8 (in Chinese).
16. Zi, H. M. Feasibility study on 1092 m cable – stayed bridge on Shanghai – Nantong HSR [Text] / H. M. Zi // Rail. Eng., 2011. – v. 6. – pp. 1-4 (in Chinese).

М. І. КАЗАКЕВИЧ*

* Каф. «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. 49 (211) 495 36 17, ел. пошта mkazak@rambler.ru

СУЧАСНИЙ РОЗВИТОК ПРОЕКТУВАННЯ І БУДІВНИЦТВА СЕРЕДНЬО – І ВЕЛИКОПРОГОНОВИХ МОСТІВ НА ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ (HSR) КИТАЮ

Мета. Огляд методів проектування і будівництва залізничних мостів середніх і великих прогонів на високошвидкісних магістралях Китаю. **Методика.** Для досягнення поставленої мети вивчено досвід проектування і будівництва середньо і великопрогонових мостів на високошвидкісних залізницях Китаю. **Результати.** Аналіз традиційних і сучасних підходів до проектування мостів на високошвидкісних магістралях залізниць Китаю і розробка сучасних вимог до проектування таких мостів. **Наукова новизна.** Пропонуються нові, високоефективні підходи до розробки проектів залізничних мостів на високошвидкісних магістралях. **Практична значимість.** Застосування отриманих результатів до розрахунків і проектування мостів на високошвидкісних магістралях залізниць Китаю.

Ключові слова: середньопрогонові мости; великопрогонові мости; мости Китаю; жорстка рама; гнучка арка; деформація балки

MICHAEL KAZAKEVITCH*

* Dept. of Bridges, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. 49 (211) 495 36 17, e-mail mkazak@rambler.ru

MODERN THE DEVELOPMENT OF DESIGN AND CONSTRUCTION MEDIUM AND LONGER SPANS OF BRIDGES ON THE HIGH-SPEED RAIL (HSR) OF CHINA

Purpose. Review of methods of design and construction of railway bridges medium and longer spans on high-speed lines in China. **Methodology.** To achieve this goal studied the experience of the design and construction of medium and longer spans bridges on the high-speed railway in China. **Findings.** Analysis of traditional and modern approaches to the design of bridges on high-speed highway of railways of China's and development of modern requirements for the design of such bridges. **Originality.** Is proposed new, highly effective approach to developing projects of bridges on high-speed railways. **Practical value.** Application of the results to the calculation and design of bridges on high-speed highways of Railway of China.

Keywords: medium spans bridges; longer spans bridges; bridges in China; rigid frame; flexible arch; deformation of the beam

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. А. І. Лантухом-Лященко (Україна).

Поступила в редколлегию 28.06.2014.

Принята к печати 02.07.2014.