

Многокритериальный подход при проектировании совмещенных мостов под железнодорожную и автомобильную нагрузки

Дальнейшее развитие транспорта приводит к проектированию совмещенных мостов под железнодорожную и автомобильную нагрузки. Отмечено, что, несмотря на большой общественный интерес к мостовому переходу через Керченский пролив, до настоящего времени не ведется широкой дискуссии в научных кругах об этом уникальном сооружении. В данной работе проведено эскизное проектирование трех вариантов мостового перехода (два параллельных моста на автономных опорах и фундаментах, два параллельных моста на опорах с объединенным фундаментом и ростверком, совмещенный мост с вертикальным расположением железнодорожного и автомобильного проездов), доказывающее преимущество совмещенного моста. В качестве базового варианта конструкции совмещенного пролетного строения предложена неразрезная двухпролетная ферма с треугольной решеткой с двумя ярусами езды: верхний – автомобильный, нижний – железнодорожный. Статический расчет выполнялся в пространственной постановке в программном комплексе Midas Civil.

Далее в первом приближении была сформулирована задача проектирования совмещенного моста в терминах многокритериальной оптимизации, хотя многие ее факторы выходят за рамки математической модели и имеют стратегический статус. В качестве искомых параметров приняты длина и высота неразрезных ферм, осевая жесткость поясов ферм; в качестве критериев – расход металла на пролетные строения, срок и трудоемкость сооружения опор и фундаментов, удобство и надежность крупногабаритного судоходства. Система ограничений содержала минимальное количество проверок по жесткости пролетного строения и прочности основных несущих элементов ферм. В статье приведены результаты многокритериальной оптимизации, которые заключаются в выделении компромиссного множества решений (множество Парето), на основе которых лицо, принимающее решение, может сделать обоснованный выбор с учетом приоритетности критериев.

Сделан вывод, что при проектировании совмещенных мостов больших пролетов под железнодорожную и автомобильную нагрузки весьма актуальной и перспективной является многокритериальная постановка задачи оптимизации мостового перехода.

Ключевые слова: *совмещенный мост, большие пролеты, Керченский пролив, многокритериальная оптимизация.*

Дальнейшее развитие транспорта в нашей стране приводит к проектированию совмещенных мостов под железнодорожную и автомобильную нагрузки. Хорошо известны совмещенные мостовые переходы через Амур в Хабаровске и на трассе Олимпийского Сочи, проекты мостов через Лену в районе Якутска и Керченский пролив.

Следует отметить, что, несмотря на большой общественный интерес к мостовому переходу через Керченский пролив, до настоящего времени не ведется широкой дискуссии в научных и проектных кругах об этом уникальном сооружении.

В данной работе проведено эскизное проектирование нескольких принципиально отличающихся вариантов мостового перехода через Керченский пролив в Жуковском створе:

- два параллельных моста на автономных опорах и фундаментах;
- два параллельных моста на опорах с объединенным фундаментом и ростверком (рис. 1);

– совмещенный мост с вертикальным расположением железнодорожного и автомобильного проездов.

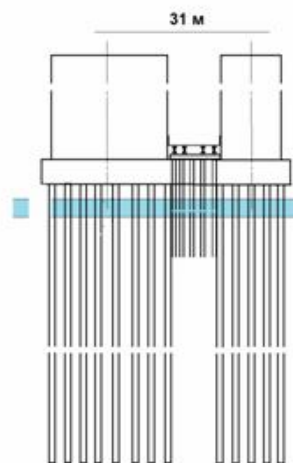


Рис. 1. Опора с объединенным фундаментом и ростверком

Геологические условия Жуковского створа характерны для морского пролива: илистые отложения с включением ракушек и органических остатков мощностью до 27 м. Ниже находятся слои текучепластичных суглинков до

глубины 70 м. Несущим слоем является твердая и полутвердая глина, залегающая на глубине до 70 м от поверхности дна.

Гидрологические условия Керченского пролива определяются наличием как грунтовых, так и напорных подземных вод, которые образуют несколько водоносных горизонтов. Особенностью пролива является наличие сильных морских течений как из Азовского моря в Черное, так и наоборот.

Сложнейшие геологические и гидрологические условия Керченского пролива обосновали существенные преимущества вариантов совмещенного моста с вертикальным расположением железнодорожного и автомобильного проездов за счет экономии средств на сооружение опор и фундаментов.

Предполагается применить в качестве свайного основания металлические забивные трубы диаметром до 2 м с толщиной стенки 20 мм и длиной до 70–80 м. Это даст возможность организовать поточное строительное производство по погружению свай без привлечения нестандартного строительного оборудования. Аналогичная технология была успешно

освоена отечественными мостостроителями в 2008–2012 гг. в ходе сооружения уникальных вантовых мостов во Владивостоке.

Дополнительным аргументом в пользу совмещенного моста является большая высота каждой опоры, что вызвано весьма значительным подмостовым габаритом (предварительно назначена высота – 35 м, что в два раза превышает параметры габаритов судоходной реки первого класса).

В качестве базового варианта конструкции совмещенного пролетного строения была выбрана двухпролетная неразрезная ферма с треугольной решеткой (рис. 2) с двумя ярусами езды: верхний ярус – четыре полосы автомобильного движения (А14, Н14), нижний ярус – два железнодорожных пути (С14) по аналогии с известным мостом через Ульяновское водохранилище (рис. 3). Все элементы ферм (верхний и нижний пояса, раскосы) имеют замкнутое прямоугольное сечение. Проезжая часть обоих ярусов выполнена в виде ортотропной плиты коробчатого сечения, включенной в совместную работу с поясами главных ферм (см. рис. 3).

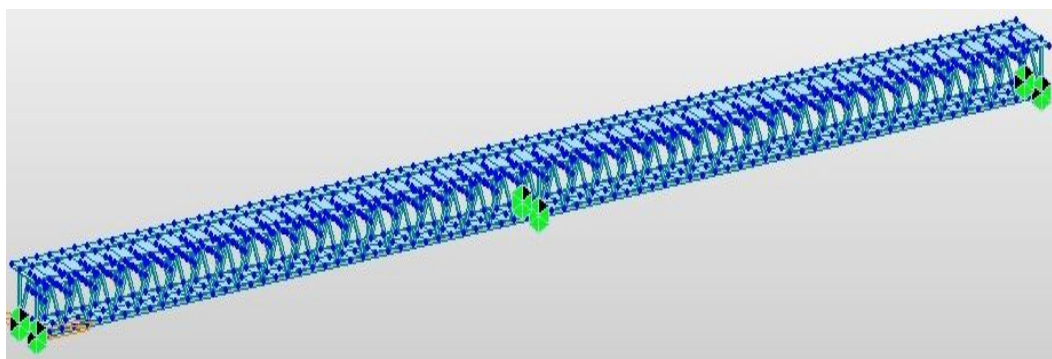


Рис. 2. Двухпролетная неразрезная ферма с треугольной решеткой

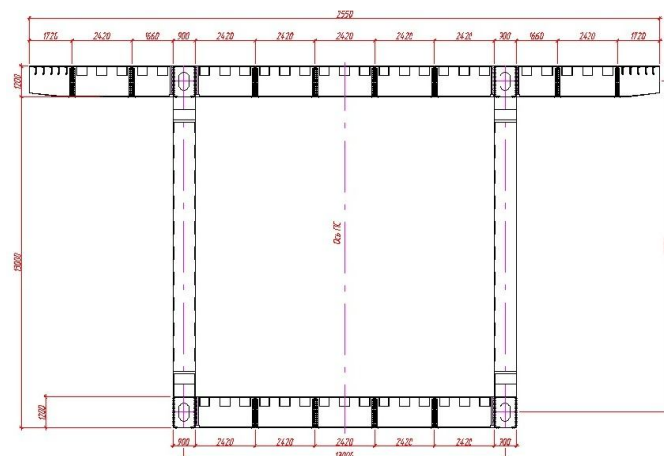


Рис. 3. Поперечное сечение двухъярусного пролетного строения

Статический расчет пролетных строений выполнялся в пространственной постановке методом конечных элементов в программном комплексе Midas Civil (см. рис. 2). Так как конструкция рассчитывается в конечно-элементной постановке, необходимо задать тип элементов, используемых в расчетной схеме. В этом качестве были приняты балочные элементы, которые наиболее полно соответствуют реальной работе конструкции. Узлы фермы приняты жесткими. В качестве материала конструкции по российским нормам принята сталь 15ХСНД [1].

Представляет интерес сопоставление величин интенсивностей железнодорожной (двух путей) и автомобильной (четырёх полос А14) нагрузок. При загрузении линий влияния неразрезной фермы с длиной пролетов порядка 200–350 м интенсивность расчетной эквивалентной автомобильной нагрузки составляет примерно 60–65 кН/м, что существенно меньше соответствующих значений железнодорожной нагрузки (280–300 кН/м) [1].

Далее был проведен поиск оптимальной длины пролета ферм совмещенного моста в диапазоне от 220 до 330 м. Для достоверности результатов были найдены экстремальные значения внутренних усилий на прочность и общую устойчивость в наиболее загруженных элементах фермы для двух сочетаний нагрузок: 1) от собственного веса пролетного строения и временной подвижной нагрузки; 2) от собственного веса пролетного строения, временной подвижной нагрузки, от ветра и действия сил торможения и тяги.

Основой статического расчета является построение и загрузка линий влияния наиболее характерных элементов неразрезной фермы, часть из которых приведена на рис. 4, 5.

Проведенный анализ показал, что тяжелая железнодорожная нагрузка от двух путей требует значительного расхода металла на пролетные строения при увеличении длины пролета (как правило, определяющей становится проверка по жесткости с нормируемой величиной прогиба $1/800$ пролета) (рис. 6). Получаемое при этом снижение стоимости опор не компенсирует существенный рост стоимости неразрезных ферм (см. рис. 6).

Для экономии расхода металла на пролетные строения до 18–25 % можно внести предложение, требующее принятия решения на стратегическом уровне: организовать движение поездов через Керченский мостовой переход по аналогии с однопутным железнодорожным тоннелем – «на мосту, как на перегоне, должен находиться один грузовой поезд» (наличие двух пассажирских поездов на двух путях одновременно оказывает меньшее воздействие и может не регламентироваться). В этом случае совмещенный мост становится «ограничивающим перегоном», но пропускная способность данного участка железной дороги будет вполне достаточной для грузового движения.

Учитывая, что фактическая однокритериальная оптимизация по стоимости совмещенного мостового перехода в зависимости от одного параметра (длины пролета фермы) не привела к решению (см. рис. 6), следует сформулировать задачу в терминах многокритериальной оптимизации (МКЗ).

В общем виде постановка МКЗ сводится к следующему: найти вектор $X \in \Omega = \{X: g_j(X) \leq 0, j = 1, \dots, m\}$ такой, чтобы

$$f_1(X) \rightarrow \min, f_2(X) \rightarrow \min, \dots, f_k(X) \rightarrow \min,$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – набор (вектор) переменных параметров конструкции, число ко-

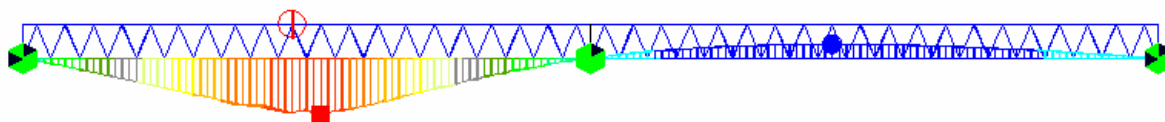


Рис. 4. Линия влияния продольных усилий в элементе верхнего пояса в середине пролета

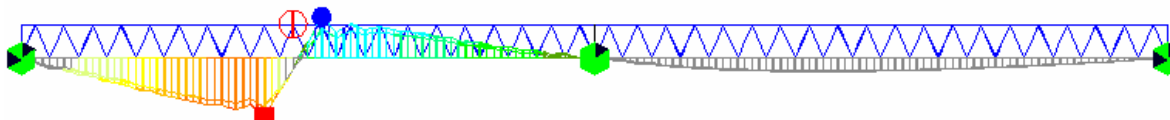


Рис. 5. Линия влияния продольных усилий в раскосе

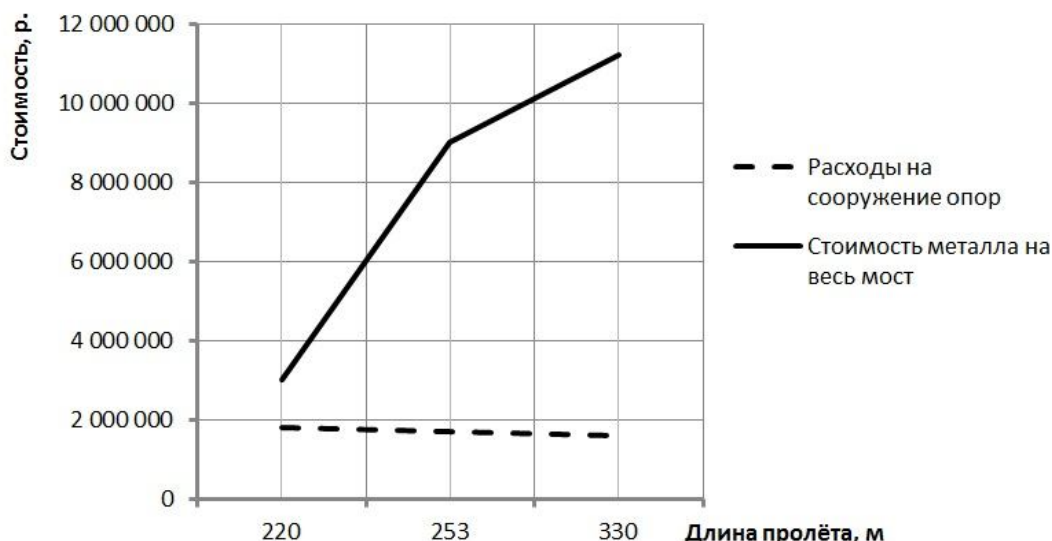


Рис. 6. Графики зависимости стоимости пролетных строений и опор от длины пролета:
 1 – стоимость металла на весь мост; 2 – расходы на сооружение опор

торых n ; $\Omega = \{X: g_j(X) \leq 0, j = 1, \dots, m\}$ – допустимое множество (область) параметров, т.е. множество всех X , удовлетворяющих системе ограничений $g_j(X)$: условиям прочности, жесткости, устойчивости, конструктивным и другим ограничениям, наложенным на проектируемую конструкцию, общим числом m ; $f_k(X)$ – целевые функции, соответствующие принятым критериям оптимальности (общий объем конструкции, масса, стоимость и т.д.).

Запись $f_1(X) \rightarrow \min, f_2(X) \rightarrow \min, \dots, f_k(X) \rightarrow \min$ следует понимать как стремление к достижению некоторого компромиссного, согласованного экстремума, не совпадающего в общем случае ни с одним из частных экстремумов. На положение искомой точки – решения МКЗ в определенной степени оказывают влияние субъективные факторы: степень предпочтения отдельным критериям, а также выявление искомого компромиссного решения со стороны расчетчика и лица, принимающего решение.

Как известно, в последние годы постановка МКЗ в области мостостроения становится достаточно востребованной: различными способами решаются задачи оптимизации ортотропных плит, вантовых и висячих конструкций, неразрезных балок и т.д. [2–10]. Одним из перспективных направлений решения МКЗ следует считать *метод исследования пространства параметров*, предложенный И.М. Соболев и Р.Б. Статниковым [11] и

примененный во многих перечисленных работах [2–10].

В данной задаче в качестве параметров совмещенного моста X можно принять достаточно традиционные величины: *длину и высоту ферм, длину панелей, жесткости элементов ферм и проезжей части* и т.д. Сложнее вопрос о выборе критериев $f_k(X)$, так как в случае общественно значимого мостового перехода (а совмещенные мосты другими быть не могут по определению) многие факторы выходят за рамки математической модели и имеют стратегический статус.

Например, в первом приближении в качестве критериев оптимизации совмещенного моста можно предложить:

- 1) общую стоимость мостового перехода;
- 2) массу пролетных строений;
- 3) стоимость опор и фундаментов;
- 4) сроки сооружения моста;
- 5) удобство и надежность крупногабаритного судоходства и т.д.

Перечисленные критерии имеют не только безусловную сложность математического выражения и многофакторную зависимость от параметров, но и огромное влияние со стороны общественно-политических и макроэкономических условий, что особенно важно для Керченского пролива.

Поэтому в первом приближении для дальнейшего обсуждения предлагается иллюстрация возможности и необходимости применения многокритериального подхода

Компромиссное множество решений П1

Номер точек	Параметры			Критерии качества		
	Длина пролета L , м	Высота ферм H , м	Осевая жесткость EA , кН	$K1$, т	$K2$, %	$K3$, м
2	220	18,5	$2,92 \cdot 10^5$	306 968	100	212
5	232	24,7	$1,9 \cdot 10^5$	296 573	95,6	222
10	243	26,6	$1,32 \cdot 10^5$	191 639	90,4	233
16	256	29,1	$2,23 \cdot 10^5$	283 792	85,8	247
19	269	31,6	$1,54 \cdot 10^5$	227 268	80,1	257
27	293	35,7	$1,76 \cdot 10^5$	282 064	75,2	282
36	329	40,2	$1,98 \cdot 10^5$	341 531	66,9	317

при оптимальном проектировании совмещенных мостов. Было выбрано три основных параметра: L – длина пролета, H – высота ферм, EA – осевая жесткость поясов ферм. Поиск оптимальных параметров проводился комбинированным методом на основе сканирования и градиентных способов по трем критериям: $K1$ – общий расход металла на пролетные строения, $K2$ – количество опор (оценивает трудоемкость сооружения опор и фундаментов), $K3$ – ширина подмостового габарита (оценивает удобство и надежность судоходства). Система ограничений $g_i(X) \leq 0$ содержала минимальное количество проверок по жесткости пролетного строения и прочности основных несущих элементов ферм.

В таблице приведены результаты многокритериальной оптимизации, которые заключаются в выделении компромиссного множе-

ства решений (множество Парето), т.е. тех найденных вариантов, которые нельзя улучшить одновременно по всем оптимизируемым критериям [2, 7].

На основе анализа лицом, принимающим решение, была выбрана точка № 10, которая превосходит остальные по критерию $K1$ и незначительно уступает другим точкам по критериям $K2$ и $K3$. Достаточно перспективными можно считать точки № 19 и 27, которые имеют преимущество по критериям $K2$ и $K3$ и сопоставимы с точкой № 10 по расходу металла ($K1$).

Таким образом, можно сделать вывод, что при проектировании совмещенных мостов больших пролетов под железнодорожную и автомобильную нагрузки весьма актуальной и перспективной является многокритериальная постановка задачи оптимизации мостового перехода.

Библиографический список

1. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная ред. СНиП 2.05.03–84*. М.: ЦНИИС, 2011. 341 с.
2. Бахтин С.А., Козьмин Н.А. Многокритериальная оптимизация конструкций городских вантовых пешеходных мостов: постановка и решение задачи // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 2. С. 35–42.
3. Бахтин С.А., Козьмин Н.А. Совершенствование конструкции вантового пешеходного моста на основе методов многокритериальной оптимизации // Политранспортные системы: Тезисы VIII Междунар. науч.-техн. конф. в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2014. С. 50–51.
4. Бузало Н.А. Деформационный расчет и оптимизация висячих комбинированных систем повышенной жесткости: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 1989. 19 с.
5. Гребенюк Г.И., Гаврилов А.А., Яньков Е.В. Расчет и оптимизация неразрезной балки тонкостенного профиля // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 7 (655). С. 3–11.
6. Демьянушко И.В., Эльмадави М.Э., Черенков П.В. Исследование влияния геометрических характеристик ребер ортотропных плит мостовых сооружений // Транспортное строительство. 2009. № 5. С. 30–32.
7. Демьянушко И.В., Эльмадави М.Э. Применение метода исследования пространства параметров для оптимизации конструкций // Транспортное строительство. 2009. № 7. С. 26–28.
8. Платонова И.Д. Управление параметрами состояния висячих и вантовых конструкций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2005. 23 с.

9. Овчинников И.Г., Дядченко И.С. Пешеходные мосты: конструкция, строительство, архитектура. Саратов: СГТУ, 2005. 226 с.

10. Шестакова Е.Б. Оптимизация элементов системы продольно-надвигаемых стальных пролетных строений автодорожных мостов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 24 с.

11. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 175 с.

S.A. Bahtin, I.O. Shmakova

Multi-Criteria Approach to the Designing of the Combined Bridges for the the Railway and Vehicular Load

Abstract. The continuous development of transport necessitates the designing of the combined bridges for the railway and vehicular load. It is highlighted, that in spite of great public interest to the bridge across the Kerch Strait, there is no broad scientific discussion on this unique construction. The paper suggests the preliminary design of the bridge in three possible options (two parallel bridges on the autonomous bridge pillars and foundations; two parallel bridges on the pillars with a joint foundation and a foundation frame; and a combined bridge with the vertical position of the railway and vehicular drive). The advantage of the combined bridge is proved. The basic alternate design of the combined deck is proposed to be a continuous dual span farm with a triangular lacing with two tiers of traffic: the top tier is designed for the vehicular traffic, and the lower one for the railway traffic. The static analysis was carried out in the spatial setting in the software package Midas Civil. Further, on a first approximation, the task of designing a combined bridge in terms of multi-criteria optimization was set, though, many of the factors are beyond the mathematical model and have a strategic status. As required parameters, the length and the height of the continuous bridge farms, axial stiffness of the farms chords are accepted; as the criteria – the consumption of metal for the spans, the duration and labour intensity of the construction of bridge pillars and foundations, and the convenience and reliability of bulky shipping are proposed. The set of constraints contains a minimum amount of inspections on the spans stiffness and the strength of the main load-bearing elements of the farms. The results of multi-criteria optimization which determine a compromise set of solutions (Pareto set), on the basis of which the decision-maker can take an informed choice with due consideration of the criteria priority. It is concluded that in case of the designing of combined bridges with large spans for the railway and vehicular load, the multi-criteria approach to the optimization of bridge crossing is relevant and very promising.

Key words: *combined bridge; large spans; the Kerch Strait; multi-criteria optimization.*

Бахтин Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, профессор, декан факультета «Мосты и тоннели», профессор кафедры «Мосты» СГУПС. E-mail: bsa1@stu.ru

Шмакова Ирина Олеговна – студентка факультета «Мосты и тоннели» СГУПС.