

МОСТОСТРОЕНИЕ МИРА



№ 2, 2014

Журнал Ассоциации мостостроителей (Фонд «АМОСТ»)



«Мостостроение мира»

Журнал Фонда «АМОСТ»

Главный редактор

С. Г. Вейцман

Редактор

В. В. Космин

Перевод

Е. А. Давидян

Фонд «АМОСТ»

Исполнительный директор

С. В. Мозалев

129343, Москва,

ул. Амундсена, 5, корп. 2

e-mail: info@amost.org

Издатель

ООО «Метро и тоннели»

Лицензия ИД №04404

тел./факс: +7 (495) 981 80 71

127521, Москва,

ул. Октябрьская,

д. 80, стр. 3, оф. 4206

e-mail: metrotunnels@gmail.com

Генеральный директор

О. С. Власов

Компьютерная верстка

С. А. Славин

Корректор

Е. М. Виноградова

Перепечатка текстов и фотоматериалов

только с письменного разрешения

Фонда «АМОСТ»

© Фонд «АМОСТ», 2014



ФОТО НА ОБЛОЖКЕ

Уравновешенный монтаж пролетного строения моста через реку Улла (см. статью на с. 17)

СОДЕРЖАНИЕ

Мостостроение мира №2, 2014

- Эстакады и путепроводы на автодороге от Сарай-Кале-Хан через канал Барапулла-Налла стадиона Джавахарлала Неру** 2
М. Тандон, С. Шривастава, А. Шривастава
- Автоматическая «шагающая» система для продольной навигации пролетных строений** 9
Ч. Юнтао, Ч. Женьчжун
- Мост через реку Улла: выдающееся сталежелезобетонное сооружение под высокоскоростную железную дорогу** 17
Ф. М. Мато, М. О. Корнехо, Л. М. Рубио
- Строительство висячего моста Ло-Пассадор через дельту реки Эбро** 25
И. Страский, Д. К. дэль Арко, П. Новотный, И. Равентос
- Проектирование и строительство моста Лас-Ламас в городе Сантандер** 29
Г. К. Мигель, М. С. Монтесинос, Х. Х. Арена, С. Г. Сото
- Восстановление и усиление бетонных конструкций с использованием сверхвысокопрочного фибробетона** 34
О. Брювилер, Э. Денарье
- Концепция плавучего моста через Согнефьорд в Норвегии** 44
С. Якобсен, П. Ларсен, Э. Сундет
- Экономичность уравновешенных консольно-балочных систем в сравнении с подвесными системами** 48
Х. Собрино
- Несбалансированное консольное пролетное строение моста через реку Мунавар, Индия** 56
А. Бхоумик, П. Гупта, С. Джайн
- Симпозиум IABSE в Мадриде, Испания** 64
- Пешеходный мост в заливе Сантандер-Бей в Испании** 66
М. Дж. Панталеон, Р. Ревилья, П. Оласабаль
- Спиральный пешеходный мост Аргансуэла** 71
К. Кастаньон, А. Серрано, Х. М. Сальсон
- Конструкция и технология сооружения в Испании пешеходного моста из сверхвысокопрочного фибробетона** 76
Х. А. Лопес, П. Серна, Э. Камачо, У. Коль, Х. Наварро-Грегори

Мост через реку Улла: выдающееся сталежелезобетонное сооружение под высокоскоростную железную дорогу

Франциско Милланс Мато (Francisco Millanes Mato), доктор наук (гражданское строительство), президент компании IDEAMSA, профессор Мадридского политехнического университета, Мадрид, Испания

Мигель Ортега Корнехо (Miguel Ortega Cornejo), магистр наук (гражданское строительство), технический директор компании IDEAMSA, профессор Мадридского европейского университета, Мадрид, Испания, miguel.ortega@ideam.es

Луис Матут Рубио (Luis Matute Rubio), магистр наук (гражданское строительство), главный инженер компании IDEAMSA, профессор Мадридского европейского университета, Мадрид, Испания

Впервые опубликовано на английском языке в журнале Structural Engineering International, SEI 1/2014, IABSE, Zurich, Switzerland, www.iabse.org, с. 131–136, под названием Viaduct over river Ulla: an outstanding composite (steel and concrete) high-speed railway viaduct

Виадук под названием Arroyo las Piedras, введенный в эксплуатацию в 2005 г., был первым в стране сталежелезобетонным балочным мостом для Испанской высокоскоростной железнодорожной линии (HSRL). Наиболее типичный для этого объекта пролет 63,5 м несколько длиннее пролетов моста Орегон – 63 м, расположенного на трассе Средиземноморской высокоскоростной железнодорожной линии Франции, который до 2005 г. был самым длинным для сталежелезобетонных железнодорожных мостов такого типа.

С тех пор на Испанских скоростных железных дорогах HSRL были построены несколько аналогичных сталежелезобетонных мостов. Более подробную информацию можно найти в публикации «Millanes F., Matute L., Ortega M., Martinez D., Bordo E. «Development of steel and composite solutions for viaducts of the Spanish High Speed Railway Lines» Hormigon y acero, 2011. – 62 (259). – PP. 7–27. ISSN 0439-5689», которая содержит анализ наиболее примечательных проектов, разработанных авторами статьи для сталежелезобетонных мостов.

В настоящей статье уделено основное внимание мосту через реку Улла – выдающемуся сооружению из сталежелезобетона, расположенному в районе с красивейшим ландшафтом.

Уникальное решение сооружения

Мост через реку Улла представляет собой наиболее важное искусственное сооружение в составе Атлантической высокоскоростной железнодорожной линии на участке между городами Ла-Корунья и Понтеведра в автономии Галисия, северо-западная Испания (рис. 1).

Возможность строительства этого объекта осложнялась экологическими требованиями в связи с размещением моста вблизи от устья реки Улла, на побережье Атлантического океана, в природном ландшафте необыкновенной красоты. Вопрос решался под давлением очень жестких ограничений со стороны природоохранных органов. В конце концов, объект стал предметом тендерного конкурса, проведенного среди наиболее известных испанских специалистов в области строительства. В статье излагаются характеристики выбранного варианта моста, запланированного к сдаче в эксплуатацию во втором полугодии 2014 г.

К сооружению моста были предъявлены следующие требования.

- Исключительная ценность природного ландшафта требовала углубленного анализа эстетических характеристик моста и его ху-

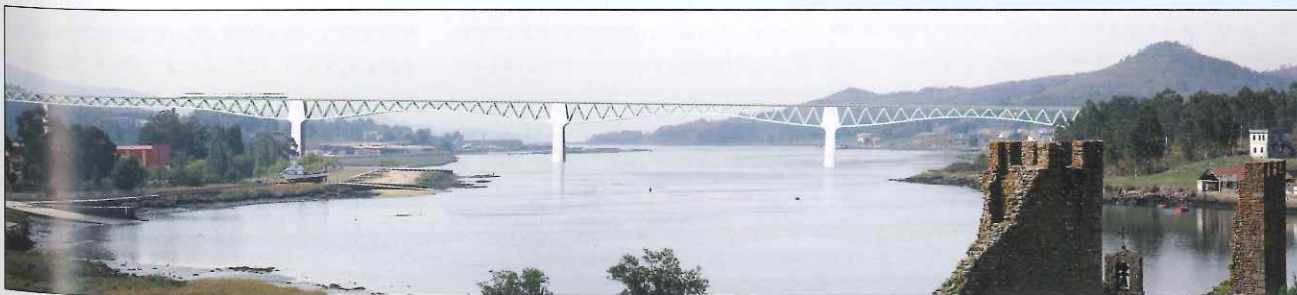


Рис. 1. Общий вид моста через реку Улла



Рис. 2. Мост через реку Улла (вид сбоку)

дожественного «включения» в окружающую среду.

- Снижение числа промежуточных опор, располагаемых в зерка-

ле воды, а также оценка необходимого числа мостов на HSRL с целью минимизации негативного воздействия на поймы и береговые зоны рек.

- Применяемые методы строительства, учитывая масштаб объекта, должны выполняться без вторжения в акваторию реки и, по возможности, исключать негативное воздействие на экологию.

- Сооружаемый мост должен обладать визуальной прозрачностью, с минимальным нарушением окружающего ландшафта.

Все перечисленные факторы заставили принять решение о проектировании сталежелезобетонной конструкции в виде металлической фермы переменной высоты с верхней железобетонной плитой мостового полотна, и с нижней железобетонной плитой на приопорных участках. Ниж-

нюю железобетонную плиту включают в совместную работу с нижним поясом фермы на тех участках пролетного строения, где действует отрицательный изгибающий момент в приопорных зонах. В схеме моста предусмотрены три главных пролета 225 + 240 + 225 м, а также несколько подходов неразрезных пролетов, перекрытых 120-метровыми фермами (рис. 4). Такая схема пролетного строения позволила довести длину главного пролета главной секции моста до величины, приблизительно на 20 % больше существовавшего к этому моменту мирового рекорда 208 м для пролетного строения аналогичной конструкции моста – через реку Майн в городе Нантенбах, Германия.

Конструктивная концепция

Главная секция представляет собой пятипролетную ферму переменной высоты (см. рис. 1 и 4), которая изменяется в диапазоне от 8,5 до 17,25 м. Высота фермы в подходов пролетах постоянная и равна 8,5 м.



Рис. 3. Общий вид опор центральной секции моста P-5 и P-8

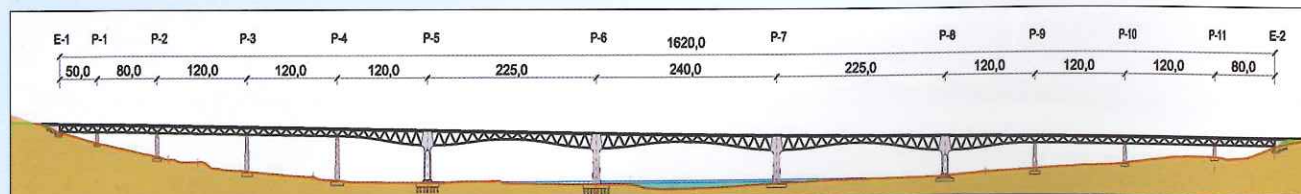


Рис. 4. Схема моста через реку Улла (размеры даны в метрах)

Четыре центральных опоры оригинальной архитектурной формы объединены с фермой, образуя рамную конструкцию, что придает центральным пролетам требуемую жесткость и вся конструкция приобретает способность выдерживать деформации от действия временной подвижной нагрузки в случае ее нахождения на разных пролетах (рис. 2). При этом следует учитывать, что для моста, по которому проходят поезда высокоскоростной железной дороги (HSR), ограничения по деформативности сооружения очень высоки.

Промежуточные опоры Р-5 и Р-8 (рис. 3), состоящие в поперечном сечении из двух отдельных вертикальных железобетонных стенок, монолитно объединенных в уровне низа пролетного строения и в уровне фундаментной плиты, обеспечивают необходимую жесткость во время прохода временной подвижной нагрузки и в то же время обеспечивают требуемую гибкость при деформациях пролетного строения от действия температуры, усадки и ползучести бетона.

Вид сооружения сохраняет традиционность визуальных восприятий фермы, однако проектировщики уделили особое внимание гармоничному сочетанию формы и геометрии железобетонных промежуточных опор и металлической фермы пролетного строения. Плавное изменение высоты ферм с параболическим очертанием нижнего пояса придает пролетному строению моста, распростершемуся над водами реки Улла, ощущение спокойствия и умиротворения, а цветовая гамма окраски в жемчужно-серый цвет бетонных поверхностей и зеленый – металлических ферм усиливает это впечатление.

Обзор конструкции

Мост длиной 1620 м имеет следующую схему разбивки на пролеты: $50 + 80 + 3 \times 120 + 225 + 240 + 225 + 3 \times 120 + 80$ м (см. рис. 4).

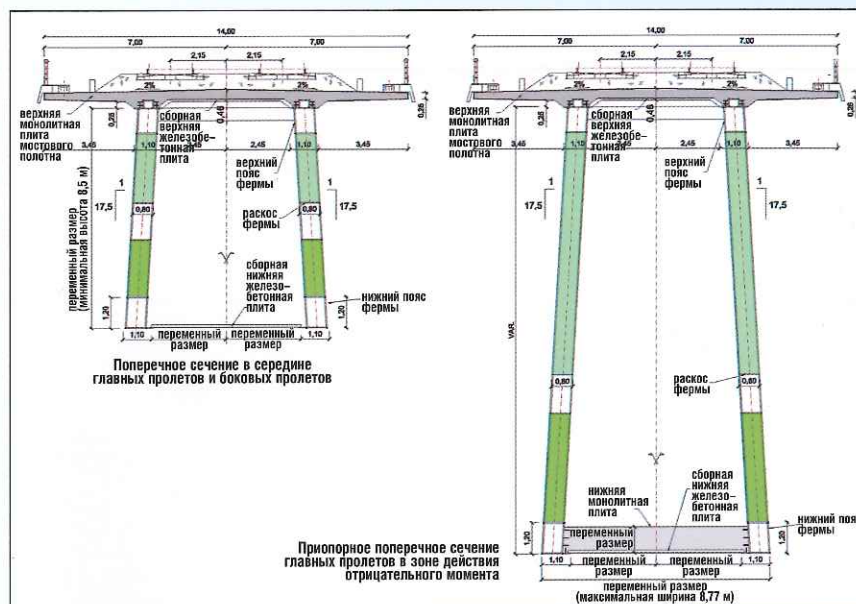


Рис. 5. Поперечные сечения (размеры даны в метрах)

Пролетное строение центральной секции решено в виде двухплоскостной металлической фермы переменной высоты, которая изменяется от 8,5 м в середине пролета (рис. 5 слева) до 17,25 м над промежуточной опорой (рис. 5 справа) с учетом включенной в совместную работу железобетонной плиты мостового полотна. Фермам придан поперечный уклон 1:17,5 сверху вниз относительно оси моста. Панель фермы имеет длину 15 м, в поперечном направлении, расстояние между осями верхних поясов 6 м. Пролетные строения боковых пролетов запроектированы с постоянной высотой 8,5 м (см. рис. 5 слева).

Поперечное сечение верхнего и нижнего поясов металлической фермы представляет собой коробчатую балку в форме параллелограмма шириной 0,8 м и высотой верхнего пояса 1 м, а нижнего – 1,2 м. Поперечное сечение раскосов также представляет собой параллелограмм с наиболее характерными размерами 0,8 м (ширина) и 1 м (высота).

К верхнему листу верхнего пояса по всей длине пролетного строения приварена продольная балка коробчатого сечения, к вертикаль-

ным стенкам которой горизонтально приварены гибкие штыревые упоры. Эта балка на всю свою высоту утоплена в бетоне опорного вуга монолитной плиты мостового полотна. Такой прием позволяет приблизить передачу сдвиговых усилий между железобетонной плитой и продольной балкой к ее центру тяжести и одновременно избежать местных напряжений от изгибающих моментов в стыках верхнего пояса фермы.

Марки стали металлоконструкций пролетных строений подходов S-355-J2+N и K2+N. Для трех центральных главных пролетных строений использовали сталь S-460-M и ML, марки стали приведены в соответствии с EN 10025. Hot rolled Products of Structural Steel, CEN, 2004.

Верхняя плита мостового полотна выполнена монолитной из бетона класса C35/45. Толщина плиты между фермами равна 0,46 м, по кромкам консолей – 0,25 м. Бетон плиты укладывали на верхний пояс фермы, на несъемную трапецевидную плиту между фермами и подвесную опалубку консолей.

На приопорных участках промежуточных опор в зоне действия



Рис. 6. Разработка котлована в акватории реки для бетонирования плиты свайного ростверка опоры Р-5

отрицательных изгибающих моментов к нижним поясам ферм присоединена для совместной работы монолитная железобетонная плита толщиной от 0,3 до 1,1 м из бетона класса С50/60 (см. рис. 5 справа).

В зонах действия положительного изгибающего момента между нижними поясами ферм установлена тонкая сборная железобетонная плита для создания визуальной замкнутости поперечного сечения пролетного строения. Она не играет какой-либо роли в работе конструкции, а служит площадкой для прохода вдоль моста при проведении осмотров и мероприятий по его обслуживанию (см. рис. 5 слева).

Центральные и боковые промежуточные опоры моста наглядно демонстрируют дифференцированный подход к конструированию в соответствии с величиной действующих нагрузок. Четыре центральных опоры главной секции моста (начиная с опоры Р-5 и кончая Р-8) монолитно объединены с пролетным строением, образуя неразрезную раму, которая обеспечивает требуемую жест-

кость конструкции и улучшает условия ее работы на восприятие горизонтальных сил (см. рис. 1 и 3). Жесткость этих опор была рассчитана с учетом возможности сопротивления кручению пролетного строения вокруг продольной оси уменьшить прогибы в трех центральных пролетах и величину изгибающих моментов, передаваемых на фундаменты.

По этим же принципам были запроектированы промежуточные опоры Р-5 и Р-8, расположенные по концам пролетов 225 м (см. рис. 3), состоящие из двух разделенных друг от друга в поперечном направлении вертикальных стенок на длине от вершины опоры до ее основания. Цель такого решения состоит в попытке избежать образования чрезмерных изгибающих моментов, которые возникают в теле опоры при нарушении статического равновесия опорных реакций от пролета длиной 225 м и пролета 120 м, опирающихся на одну опору и восприятия деформаций от действия температуры на пролетные строения, и от усадки и ползучести бетона. Оба последних вида деформаций приобретают большое зна-

чение еще и потому, что рассматриваемые опоры расположены достаточно далеко от двух центральных опор секции, т. е. от точки нулевых перемещений.

Что касается остальных промежуточных опор, то поперечному сечению тела промежуточных опор боковых пролетов от Р-1 до Р-4 и от Р-9 до Р-11 придана более традиционная форма в виде полого прямоугольника со стенками переменной толщины как в поперечном, так и в продольном направлении.

На каждой из концевых промежуточных опор и на обоих устоях установлены по две сферические опорные части, одна из которых допускает свободное перемещение во всех направлениях, а вторая — только продольные перемещения. Все опорные части установлены таким образом, что их плоскости скольжения горизонтальны. Исключение составляет устой А1, на котором плоскости скольжения опорных частей расположены с уклоном, повторяющим продольный уклон пролетного строения (–1,8 %). Это сделано для того, чтобы избежать нежелательных вертикальных смещений железнодорожного пути. На устой А2 вследствие небольшой величины уклона плоскости скольжения опорных частей расположены горизонтально.

Фундаменты промежуточных опор устроены на естественном основании и опираются непосредственно на существующую гранитную плиту. Исключения составляют промежуточные опоры Р-5 и Р-6, у которых в основании оказался достаточно мощный слой аллювиальных отложений, не позволивший применить фундаменты на естественном основании. В этом случае пришлось сооружать свайные фундаменты глубокого заложения (рис. 6). Наиболее мощный фундамент был устроен под опору Р-6 с погружением 56 буронабивных свай диаметром 1,5 м, с устройством железобетонной плиты ростверка размерами 34,5×30×5,5 м.

Последовательность строительно-монтажных работ

Последовательность производства мостостроительных работ должна быть построена на принципе минимального нарушения экологии реки (которая может впоследствии обернуться отрицательными явлениями) и одновременно обеспечивать технологичность и рациональность.

Фундаменты промежуточных опор Р-5, Р-6 и Р-7 попали в русло реки, и их пришлось возводить в двойном круговом шпунтовом ограждении очень больших размеров (рис. 7). Диаметр наружной шпунтовой стенки составляет 68 м, а внутренней – 48 м, ширина засыпного кольца между двумя стенками позволила выполнять насухо работы по погружению свай, сооружению плиты ростверка на опорах Р-5 и Р-6, а также по устройству фундамента на естественном основании.

Чтобы обеспечить подъезд к площадкам, на которых сооружаются фундаменты трех указанных промежуточных опор, был построен временный мост с металлическими пролетными строениями длиной 6 м, опирающимися на однорядные опоры из забивных металлических свай. Строительство этого временного подъездного моста вели с сохранением естественных парамет-



Рис. 7. Вид сверху на сооружение промежуточных опор в акватории реки

ров речного русла и со сведением к минимуму возможного загрязнения акватории, руководствуясь требованиями сохранения условий обитания местной фауны. Временный мост упростил движение транспорта и подачу механизмов к площадкам сооружения опор с обоих берегов реки и исключил необходимость использования плавсредств для доставки конструкций и материалов.

После завершения работ по устройству фундаментов были возведены железобетонные опоры с

использованием скользящей опалубки. По окончании бетонирования части железобетонных опор с Р-5 по Р-8 (без верхнего объединительного блока между фермами) в их основания по обе стороны от опоры в горизонтальном положении были смонтированы так называемые «нулевые» фасадные панели металлических ферм пролетного строения в форме буквы W. Затем обе панели одновременно поднимали и закрепляли с обеих сторон опоры (рис. 8а, б).

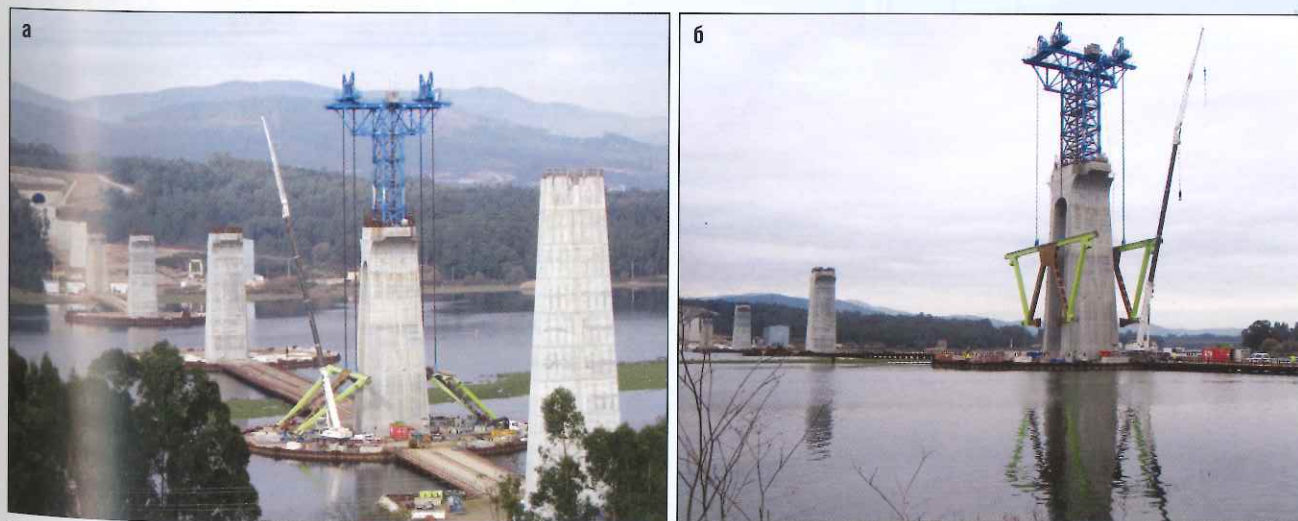


Рис. 8. Подготовка к операции одновременного подъема двух W-образных блоков металлического пролетного строения (а); подъем блоков на центральной промежуточной опоре (б)

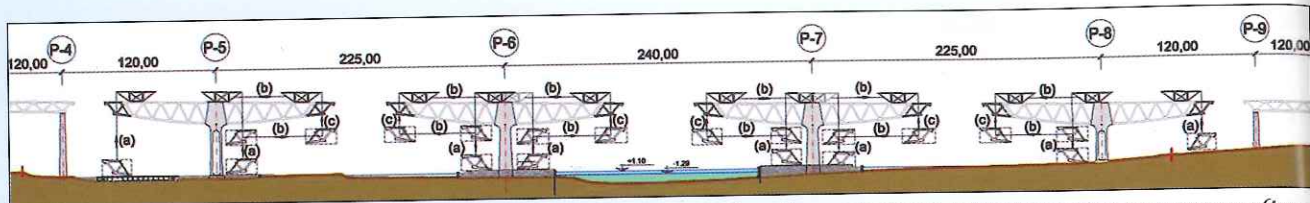


Рис. 9. Схема последовательного возведения пролетного строения методом уравновешенного консольно-навесного монтажа (размеры даны в метрах)

Вес этих огромных нулевых панелей ферм составлял около 375 т, а их габаритные размеры: 35 м (длина по фасаду моста) и 17,5 м (высота).

После бетонирования верхней части опоры, объединяющей ее с фермами (см. рис. 3), к поясам нулевых панелей в обе стороны монтировали уравновешенным

навесным способом очередные пространственные металлические блоки фермы вплоть до замыкающего блока в середине пролета (рис. 9). Подобный способ ве-



б



Рис. 10. Схема последовательного возведения пролетного строения тремя способами (а) и объемы работ, выполненные по состоянию на декабрь 2013 г. (б) (третий вариант монтажа)

дения работ предоставляет возможность провести все монтажные работы по сооружению пролетного строения, не затрагивая охранные зоны поймы реки, берегов и окружающей растительности. Отдельные линейные элементы ферм длиной 15 м – пояса, раскосы, узлы и элементы связей, входящих в состав двух плоскостей одного монтажного блока, – поступали на объект с завода-изготовителя. Сварочные укрупнительные работы вели на трех полигонах металлоконструкций, расположенных на берегах реки, и собранные монтажные блоки транспортировали к основанию соответствующей береговой опоры. Для транспортировки использовали специальные многоосные колесные платформы, позволяющие подвести элемент непосредственно к опоре.

При поступлении блока к опоре его перемещали монтажным краном ближе к телу опоры, разворачивали в пространстве до положения, соответствующего его позиции в структуре фермы, поднимали и элементы приваривали к соответствующим элементам собранной части. Эти работы были начаты в июле 2013 г. Их окончание запланировано на начало 2014 г.

Пролетные строения постоянной высоты со стороны обоих берегов монтировали разными способами вследствие различных условий подходов. Недалеко от устоя А1 проходят несколько местных автомобильных дорог и местная железнодорожная ветка, в связи с чем монтажные работы на этом берегу пришлось разделить на три различные стадии (рис. 10а). Из-за недостатка свободного пространства за устоем и близко расположенного к нему портала железнодорожного тоннеля невозможно было подготовить надлежащую стартовую монтажную площадку для продольной надвигки пролетного

строения. Эти площадки длиной 50 и 80 м устроили на клетках в пролете между устоем А1 и промежуточной опорой Р2 (см. рис. 10а).

Каждое пролетное строение длиной 120 м собирали на стапеле, соединяя блоки сварными стыками. Собранные пролетные строения кранами поднимали на постоянные промежуточные опоры и надвигали в пролет (см. рис. 10а).

В процессе второй операции надвигки собрали и продвинули вперед два пролетных строения длиной 120 м. Наконец, пролетные строения последних боковых пролетов между опорами Р1 и Р2 (50 + 80 м) собирали на постоянных и временных опорах непосредственно в пролете.

Таким образом, монтаж четырех крайних пролетных строений со стороны устоя А1 был полностью завершен зимой 2013–2014 гг. (рис. 10б).

Поскольку для монтажа пролетных строений подходов пролетов со стороны устоя А2 не существовало ограничений, за-

трудняющих работы и подобных тем, которые имели место на участке устоя А1, проект предполагал, что пролетные строения в полностью собранном состоянии в этой части моста можно будет монтировать в пролет кранами (рис. 11).

В осуществление этого решения отдельные элементы двух плоскостей ферм раскладывали на клетках, соединяли электросваркой и каждый из пролетов этой секции моста поднимали с уровня земли по вертикали непосредственно в пролет, с последующей пристыковкой на сварке к ранее смонтированным блокам пролетного строения. Такая технология обеспечивала неразрезность плети (см. рис. 11). Вес 120-метрового пролетного строения составлял около 1200 т, а 80-метрового – около 80 т.

По завершении монтажа металлоконструкций на нижнем поясе балок устанавливали тонкие сборные железобетонные плиты, на которых как на оставляемой опалубке в зонах действия отри-

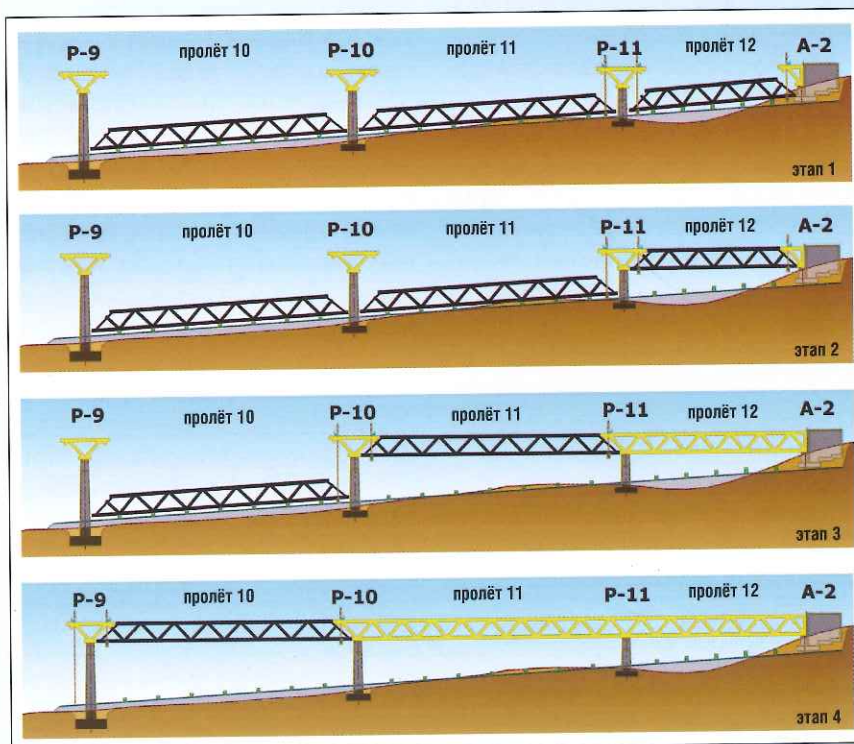


Рис. 11. Схема монтажа пролетных строений подходов пролетов вблизи устоя 2



Рис. 12. Пролетные строения вблизи устья А2 (120 + 120 + 80 м), подготовленные к монтажу подъемом (а); состояние работ на момент написания статьи (б)

цательных изгибающих моментов бетонировали нижнюю монолитную плиту. В процессе следующей операции на крайних опорах главной секции моста (опоры Р-4 и Р-9) концы пролетного строения одновременно опустили на 0,25 м. Задача этого приема состоит в стремлении уменьшить величину изгибающих моментов от второй части постоянной нагрузки и от временной подвижной нагрузки, расположенной на участках между опорами Р-5 и Р-8. Эти моменты возникают от неравенства длины смежных пролетов, опирающихся на эти опоры: с одной стороны пролетное строение длиной 120 м, а с другой стороны – длиной 225 м.

Монолитный бетон плиты мостового полотна также укладывали на оставляемые опалубочные сборные железобетонные плиты, которыми перекрывали пространство между металлическими поясами ферм, а консольную часть бетонировали с помощью подвижной опалубки.

В качестве завершающей операции шпунтовые стенки, ограждающие площадки для сооружения промежуточных опор Р-5, Р-6 и Р-7, а также временные подъездные мосты с металлическими пролетными строениями были разобраны с последующей ликвидацией всех последствий присутствия этих сооружений в акватории реки. По фотографии (рис. 12а, б) можно судить об объеме выполненных строительных работ по состоянию на декабрь 2013 г.

Заключение

Мост через реку Улла расположен в окружении великолепного ландшафта. Он проектировался и строился в условиях действия жестких экологических ограничений. Эти факторы обязывали проектировщиков составлять проект моста с пролетными строениями в виде сталежелезобетонных ферм общей длиной 1620 м и с тремя главными пролетами чрезвычайно большой длины: 225 + 240 + 225 м, прикладывая значительные усилия, чтобы надлежащим образом выполнить все предъявляемые требования.

Существенные размеры монтажных блоков пролетного строения моста, а также трудности, возникающие при выполнении строительных работ в условиях действия разнообразных ограничений, обусловили необходимость проектирования трех разных вариантов ведения монтажных работ и разработки сложных конструктивных решений, которые описаны в прилагаемой статье.

Главные центральные пролетные строения возводили с применением метода уравновешенного навесного монтажа. Полностью собранные боковые пролетные строения подходных секций длиной 120 м со стороны устья А-2 монтировали в пролет кранами. В то же время аналогичные пролетные строения на другом берегу монтировали способом продольной надвигки с ис-

пользованием временных промежуточных опор.

Мост будет сдан в эксплуатацию осенью 2014 г. С этого момента он станет рекордным среди железнодорожных мостов такой конструкции пролетного строения в мире с длиной пролета 240 м, которая на 20 % превышает длину главного пролета моста Нантенбах через реку Майн в Германии. ■

Справка журнала SEI по участникам работ, объемам и расходу материалов

Заказчик – Railway General Direction. Spanish Ministry of Public Works («Fomento» Ministry)

Проектировщик – IDEAM S.A., Мадрид, Испания

Подрядчик – UTE rio Ulla, Dragados Tesca

Металлоконструкции – 19300 т

Монолитный бетон (верхней плиты) – 8620 м³

Монолитный бетон (нижней плиты) – 2800 м³

Арматурная сталь (плит) – 2900 т

Полная стоимость объекта – 95,6 млн евро

Дата ввода в эксплуатацию – зима 2015 г.