

# ПЕШЕХОДНЫЙ МОСТ В ГЕЛЬЗЕНКИРХЕНЕ: ТЕХНОЛОГИЧНАЯ ЭЛЕГАНТНОСТЬ

К северу от немецкого города Гельзенкирхен, сразу за зоопарком ZOOM-Erlebnisswelt, в июне 2009 г. появился висячий пешеходный мост, пересекающий канал Рейн–Херне. Элегантная, буквально захватывающая дух горизонтальная кривая моста с пролетом 141 м соединила велосипедную и пешеходную дорожки улицы Эрцбанштрассе на южном берегу канала с парком Эмшер, разбитом на северном берегу.

Рис. 1. Висячий мост в гавани Гримберг

**К**онструкция моста сочетает в себе оригинальные архитектурные, эстетические и инженерные решения, что отразилось в легкости, целостности и экономичности его конструкции. Используя необычную анкеровку главного несущего каната, не потребовавшую сооружения традиционных массивных анкерных опор, а также сложную пространственную геометрию, авторы проекта нашли способ придать своему детищу современные архитектурные и инженерные формы.

## СОЕДИНЕНИЕ С СЕТЬЮ

### История проблемы

Улица Эрцбанштрассе протяженностью 9 км расположена на месте старой железной дороги, когда-то обслуживавшей железорудные карьеры, и проходит от Бохума до гавани Гримберг, пересекая многочисленные восстановленные мосты на участке от Херне до Гельзенкирхена. В последние



Рис. 2. Конкурсная модель

годы она подверглась масштабной реконструкции и превратилась в своеобразную туристическую тропу, дополненную велосипедной дорожкой.

Мост, перекрывающий канал Рейн–Херне рядом с гаванью Гримберг осуществил давнюю мечту местных

жителей и соединил рекреационные туристические маршруты с парком Эмшер.

Помимо своего утилитарного содержания, мост должен был стать оригинальным архитектурным объектом, служащим своеобразным противо-

весом расположенному на северном берегу новому концертному залу «Сенчури-Холл».

В архитектурном конкурсе, объявленном в июле 2006 г., приняли участие десять специально приглашенных групп инженеров и архитекторов. Помимо функциональных задач, конкурсное задание включало необходимость решения проблемы безболезненного «внедрения» объекта в окружающий пейзаж с минимальным вмешательством в работу расположенного рядом зоопарка.

Жюри конкурса определило, что предъявленным требованиям наиболее полным образом отвечает криволинейный висячий мост (с присуждением первой премии), который и было рекомендовано воплотить в жизнь (рис. 1).

Архитектурные и функциональные требования

Новый мост наилучшим образом соединяет направления обеих основных трасс: входящая с юго-востока Эрцбанштрассе по касательной переходит в северную тропу, которая расположена вдоль берега в направлении с востока на запад (рис. 2).

Пространственную компоновку пролетного строения осуществляли с расчетом соблюдения высотных габаритов судоходства по каналу Рейн—Херне. Кроме того, чтобы предотвратить столкновение судов с опорами будущего моста, в проектное задание включили требование, запрещающее располагать опоры ближе 5 метров от линии уреза воды в канале.

## КОНСТРУКЦИЯ

### Общие соображения

С учетом перечисленных выше ограничений, мост был запроектирован однопролетным, без опор в канале Рейн — Херне. Круговая кривизна пролетного строения соответствует нормативным геометрическим параметрам велосипедной дорожки и хорошо вписывается в окружающую обстановку.

Въездные ramпы поднимаются с уровня дорожки и заканчиваются на криволинейном пролетном строении (рис. 3). Южная ramпа выполнена в виде наклонной насыпи. Северная железобетонная ramпа, внешне сохраняя поперечное сечение металли-

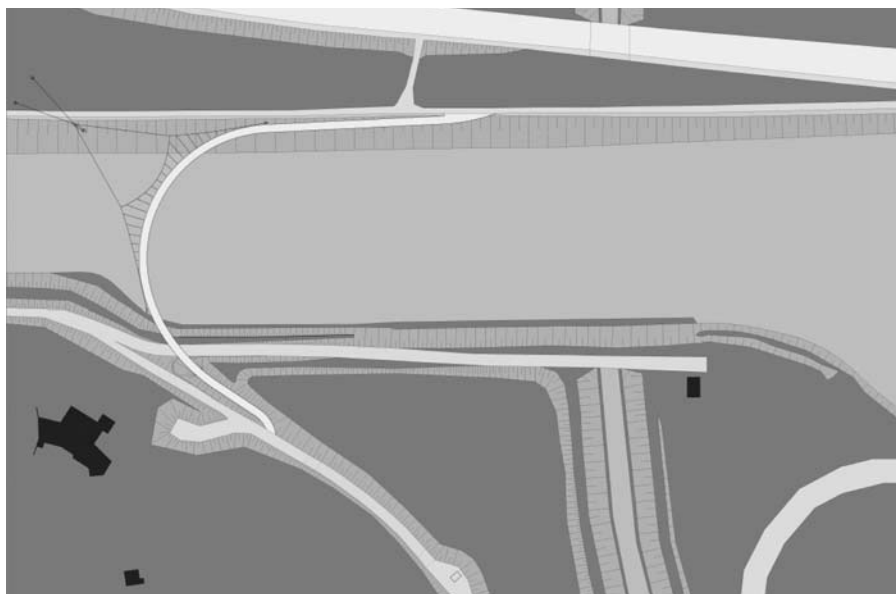


Рис. 3. План

ческого пролетного строения, обеспечивает подъем на мост.

Кривизна пролетного строения и односторонняя система подвески потребовали жесткой заделки пролетного строения на устоях. Изменение длины конструкции от температурных колебаний воспринимает само пролетное строение, которое гибко деформируется, изменяя кривизну и оставаясь при этом в горизонтальной плоскости. Отсутствие требующих ухода опорных частей и деформационных швов делает конструкцию моноблочной, придает пролетному строению дополнительную надежность и до минимума сокращает эксплуатационные издержки.

Криволинейное металлическое пролетное строение длиной 141 м поддерживается системой канатов за свою внешнюю кромку, будучи подвешенным к мачте-пилону высотой около 45 м, установленной на северном берегу канала. Главные несущие кана-

ты прикреплены к пролетному строению по касательной, их концы заанкерены без устройства каких-либо специальных анкерных опор, традиционных для подобных висячих систем. Расстояние от этих анкеров до устоев составляет около 24 м. С помощью фрезерованных стяжных канатных хомутов к главным несущим канатам с трехметровым шагом прикреплены 30 канатов подвески, изготовленных из нержавеющей стали. Для того чтобы сократить длину средних канатов подвески и не протягивать их до мачты, в оба главных несущих каната вплетен вторичный канат, которому придано очертание провисающей гирлянды.

Мачту удерживают два обратных каната-оттяжки. Они заанкерены в грунте с помощью предварительно напрягаемых стержней с регулируемым напряжением, а также постоянных грунтовых анкеров. Железобетонные фундаменты грунтовых анкеров

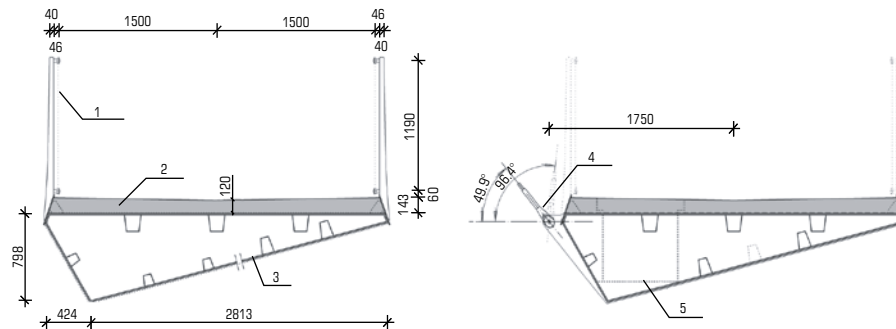


Рис. 4. Поперечное сечение пролетного строения:

1 — перильное заполнение в виде сетки из высокопрочного каната; 2 — железобетонная плита,  $t = 12$  см; 3 — металлическая балка коробчатого сечения; 4 — серьга каната подвески; 5 — демпферная камера



**Рис. 5. Система подвески**

и мачты опираются на буровые сваи длиной 23 м.

Поперечное сечение балки пролетного строения выполнено в форме полигональной коробки. Такое очертание придает ей большую жесткость для восприятия изгибающих и крутящих моментов от ассиметрично действующей нагрузки и от нагрузки на участках, не имеющих опирания в пролете от устоев до первых подвесок (рис. 4).

### Поиски формы

Кажущаяся простота и логика размещения главных несущих канатов, канатов подвески, каната-гирлянды и канатов-оттяжек в действительности диктовались большим количеством строгих функциональных и конструктивных требований. В том числе, таких, как:

- необходимость обеспечения минимально требуемой длины самых коротких подвесок на участке вблизи точки анкерки главного каната на пролетном строении, а также соблюдения некоторых ограничений, налагаемых на величину усилий в подвесках.

- необходимость обеспечения минимально требуемой длины средних подвесок, а также соблюдения некоторых ограничений на усилия в канатах-гирляндах.

- необходимость соблюдения некоторых ограничений на величину усилий во всех канатах с целью получения их наиболее экономичных сечений и тем самым сохранения эстетичности и ажурности системы подвески, которая

должна соответствовать легкости, ассоциируемой с пешеходными мостами.

- необходимость обеспечения отсутствия непосредственного контакта главных несущих канатов с поручнями перил: главные канаты от своих анкеров проходят к пролетному строению и только потом поднимаются на вершину мачты с минимальным зазором между главными канатами и перилами (всего около 5 см!).

- необходимость, по возможности, выравнивания усилий в канатах системы подвески.

- уменьшение эксцентриситета между анкерами главного каната и пролетным строением.

- уменьшение до минимума высоты мачты для сохранения визуального единства элементов моста.

Важными целями поиска оптимальной компоновки являлись высота и положение мачты, длины прямолинейных участков главных несущих канатов, положение точки соединения главных канатов с канатами гирлянды, а также эксцентриситет анкеров главного каната и пролетного строения (рис. 5).

## КОМПОНОВКА

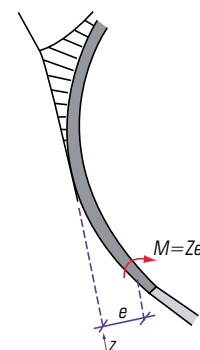
### Односторонняя подвеска

Круговая кривизна пролетного строения позволила осуществить его одностороннюю подвеску. Однако при этом неизбежно возникновение крутящих и

изгибающих моментов, в основном как результата анкерки главных канатов, которую осуществили без устройства промежуточных анкерных опор.

### Работа конструкции

Согласно концепции висячих мостов с анкеркой главных канатов вне пределов пролетного строения, усилия в главных канатах проходят через пролетное строение и воспринимаются устоями, в которых канаты анкеруют. Такая схема представляет определенную трудность, в частности, в зоне южного устоя, где продольные силы должны менять свое направление, подчиняясь принятому радиусу на участке без каких-либо опор. Ввиду уже упомянутых геометрических границ, в зоне устоя (рис. 6) неизбежно возникновение больших поперечных изгибающих моментов.



**Рис. 6. Поперечный изгиб из-за переноса нормальной силы**

Ввиду жесткого соединения балки пролетного строения с устоями, жесткость устоев, заделанных в грунте, играет значительную роль при определении размеров фундаментов, самих устоев и поперечного сечения пролетного строения: чем выше жесткость устоев, тем большей величины достигнут изгибающие моменты в пролетном строении. По этой причине при расчете общей системы по методу конечных элементов следует рассматривать возможность изменения параметров, характеризующих жесткость грунта.

### Геометрия строительного подъема

Чтобы компенсировать прогибы, возникающие от постоянных нагрузок, пролетному строению придали сложный пространственный строительный подъем (рис. 7), который в сочетании с жестким соединением пролетного строения с устоями позволяет контролировать продольные деформации.



Рис. 7. Пространственная геометрия пролетного строения, с учетом корректировки на монтаж

Поскольку поперечный изгибающий момент у южного устоя имеет строго определенное направление, которое диктуется геометрическим изменением траектории главного несущего каната, максимальная нагрузка снижается путем регулируемого расклинивания обоих устоев дугообразной конструкцией пролетного строения.

Иными словами, после закрепления торца пролетного строения на южном устое недеформированная балка жесткости перекрывает линию соединения пролетного строения с северным устоем приблизительно на 50 см в сторону берега. Деформируя пролетное строение до состояния, когда его можно соединить с северным устоем, т.е. «вскивая» балку с геометрией заводского строительного подъема в ее проектное положение между устоями, поперечный изгибающий момент в зоне южного устоя значительно уменьшается.



Рис. 8. Поперечный аэродинамический обтекатель

### Динамические реакции

Степень динамической податливости пролетного строения определяют его гибкость (толщина балки составляет всего 80 см при длине пролета 141 м, что соответствует коэффициенту 1/175), а также оптимальность аэродинамического профиля его поперечного сечения.

Расчеты воздействия колебаний, создаваемых пешеходами, показали, что пролетному строению теоретически требуются демпфирующие устройства, которые ограничивали бы горизонтальные и вертикальные ускорения. Однако опыт эксплуатации аналогичных объектов показывает, что, казалось бы, точно рассчитанная система демпфирования всего сооружения с учетом всех факторов влияния, например, железобетонной плиты или перильного ограждения в виде сетки, сплетенной из канатов и проволок, в действительности не отражает реальной картины. Поэтому было принято решение установить в поперечном сечении пролетного строения камеры для демпфирующих устройств, не размещая при этом никаких демпферов.

Фактическая необходимость дальнейших исследований воздействия на пролетное строение колебаний, создаваемых пешеходами, была признана неактуальной. Такое решение было принято после проведения испытаний построенного моста, когда в присутствии заказчика по нему

пропустили группу пешеходов, специально инструктированных для воспроизведения требуемого динамического эффекта. В итоге оказалось, что пролетное строение проявило прогнозируемо спокойную реакцию на такое воздействие, несмотря на всю его кажущуюся гибкость. В отличие от пренебрежительно малых колебаний, вызванных пешеходным воздействием, колебания от ветровой нагрузки потребовали принятия дополнительных конструктивных мер: испытания в аэродинамической трубе достаточно жесткого участка модели пролетного строения показали вероятную опасность галопирующей потери поперечной устойчивости. Таким образом, в результате испытаний на внешних углах поперечного сечения балки появились обтекатели (рис. 8).

## СТРОИТЕЛЬСТВО

### Детали

Металлическая коробчатая балка 3-метровой ширины образует хребет пролетного строения, на котором лежит железобетонная плита толщиной 12 см, служащая надёжной опорой для пешеходов, и одновременно своим весом и демпфирующими свойствами повышающая динамическую устойчивость пролетного строения (рис. 9).



Рис. 9. Пролетное строение



Рис. 10. Фрезерованные стяжные хомуты канатов

Полигональная коробчатая балка в поперечном сечении составлена из пяти металлических листов, толщиной от 15 до 45 мм. Через каждые 3 метра длины балки внутри нее установлены диафрагмы из листов толщиной 15 мм, в этих же сечениях к пролетному строению присоединены канаты подвесок из нержавеющей стали.

Канаты подвесок диаметром 24 мм присоединены к главным несущим канатами закрытого типа диаметром 95 мм и к канатам гирлянды, также закрытого типа, диаметром 50 мм с помощью фрезерованных стяжных канатных хомутов (рис. 10).

Главные несущие канаты соединены с пролетным строением посредством

цилиндрических анкеров стаканного типа, расположенных на расстоянии 24 м от устоев. На вершине мачты они анкеруются с помощью открытых цинковых стаканов. Сужающаяся вверх мачта диаметром в основании 1,1 м и толщиной стенки 40 мм установлена на северном берегу канала в слегка наклонном положении. Она опирается на опорную часть в виде сферического шарнира, в ее фундамент погружено четыре 12-метровых буровых свай диаметром 90 см.

В качестве обратных оттяжек применены два каната закрытого типа диаметром 95 мм. Они прикреплены к специальным кронштейнам и заанкерованы в фундаменты оттяжек

с помощью десяти высокопрочных стержней, используемых для создания предварительного напряжения. Стержни диаметром 36 мм изготовлены из стали марки S950/1050. Фундаменты канатов оттяжек закреплены в грунте от выдергивания грунтовыми анкерами, заложенными на глубину до 35 м и соединенными с фундаментом 18 предварительно напрягаемыми стержнями на один фундамент.

Жесткое объединение балки пролетного строения с устоями выполнено крупногабаритными металлическими закладными деталями с контактными пластинами и приваренными гибкими штыревыми упорами. Фундаменты устоев представляют собой свайные ростверки, опирающиеся на частично наклонные буровые сваи (8 свай под южный устой и 6 свай под северный устой) диаметром 90 см, при глубине погружения до 23 м.

К северному устью подходит 37-метровая въездная рампа, представляющая собой замкнутый железобетонный лоток, который визуально продолжает внешний облик и поперечное сечение металлической балки пролетного строения до самого соприкосновения с землей.

Стойки перил расположены вдоль пролетного строения с 3-метровым шагом, и размещены в середине расстояния между диафрагмами, чтобы визуально не создавать единой вертикали с подвесками. Перила выполнены в виде каната из нержавеющей стали с филигранной поверхностью плетения. Перильное заполнение в виде плетеной сетки также из каната малого диаметра из нержавеющей стали с ячейками шириной 60 мм прикреплено к стойкам и простирается непрерывно по длине моста и за его границы с общей длиной около 190 м (рис. 11).

## Расчеты

Общая конструктивная система моста рассчитывалась методом конечных элементов как пространственная геометрически нелинейная рама (по теории третьего порядка) с применением вычислительной программы, разработанной компанией SOFiSTiK AG. Расчет свайного фундамента велся с учетом горизонтальных упругих параметров. Расчетные ограничения, вытекающие из необходимости придания пролетному строению сложного пространственного строительного

подъема, определялись методом узловых перемещений с учетом пространственного нарушения формы поперечного сечения. Как уже упоминалось выше, определение геометрических параметров и расчет предварительного натяжения канатов системы подвески проводились раздельно, но в комплексе всей конструкции.

При расчете конструкции ее проверяли на воздействие следующих сочетаний нагрузки:

- постоянная нагрузка.
- равномерно распределенная и неравномерная временная подвижная нагрузка.
- сосредоточенные нагрузки от обслуживающих транспортных средств весом до 4.5 т.
- ветровые нагрузки.
- изменения температуры всей системы от +41 до -36о С.
- изменение температуры канатов в диапазоне +/- 15о С.
- осадка опор 2 см.

Результаты расчета конструктивного комплекса были использованы для определения размеров элементов металлоконструкции балки пролетного строения, канатов системы подвески, мачты, анкерующих устройств и фундаментов.

Некоторые детали узлов конструкции проектировались с использованием специфических разделов метода конечных элементов, в частности, расчета устоев и их конструктивных компонентов, анкеровки главного каната, а также расчета кронштейнов и фундаментов канатов оттяжек.

### Проверка устоев

Расчет устоев в части геометрии закладных деталей, распределение нагрузки в железобетонной конструкции, сложной конфигурации армирования и определение потока сил в буровых сваях были осуществлены также с использованием отдельных узкоспециальных математических моделей метода конечных элементов.

Для проверки прочности закладных деталей устоя и пролетного строения в узлах его примыкания к устою, участки от S01 до S03 (южный устой) и S49 до S51 (северный устой) были смоделированы как местные, частные FE модели (рис. 12).

Проверка прочности железобетонных устоев и свайных ростверков выполнялась по модели аналогии

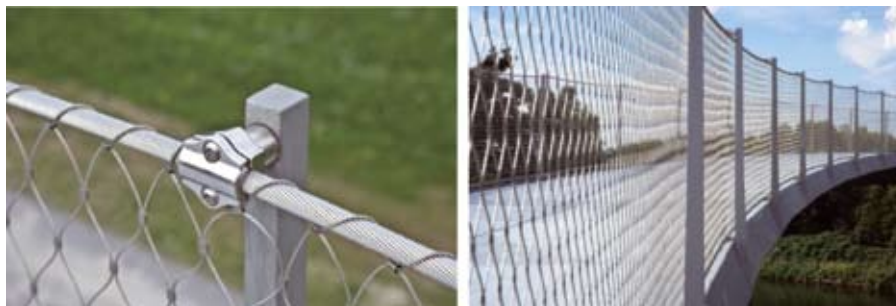


Рис. 11. Перильное ограждение

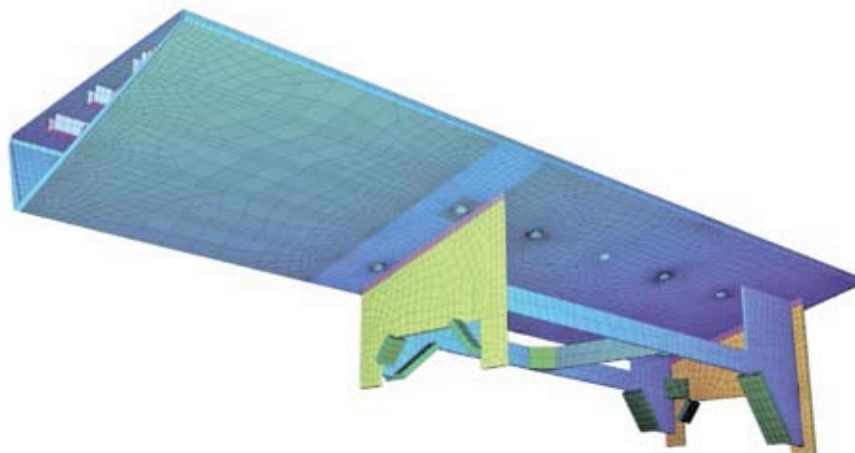


Рис. 12. Модель северного устоя для расчета методом конечных элементов с рас-становкой металлических закладных деталей

железобетонных конструкций с работой шарнирной фермы. В FE модели армирующие элементы представлены как сжатые или растянутые элементы, а сжатые диагонали — как пружинные, которые не воспринимают растягивающих усилий (рис. 13).

Таким образом, можно воссоздать поток сил в компактной конструкции устоя, и, соответственно, скорректировать конфигурацию армирования.

### Фундаменты и железобетонные конструкции

После завершения погружения буровых свай под устои и мачту была выставлена арматура ростверков, установлена опалубка, затем эти элементы были забетонированы. Что касается бетонирования устоев, то согласно принятой последовательности работ, бетонную смесь в конструкцию устоев подавалась через трубы, сваренные в балку пролетного строения только после ее установки в проектное положение. При этом, учитывая большой объем армирования, при бетонировании устоев применялась самоуплотняющаяся бетонная смесь текучей консистенции. Одновремен-

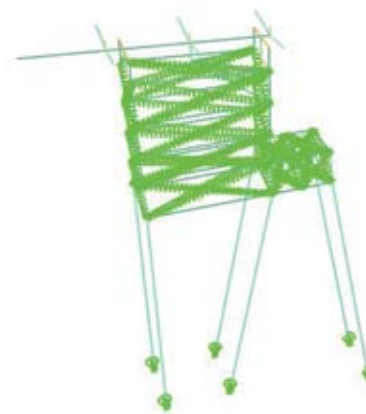


Рис. 13. Модель северного устоя для расчета методом конечных элементов с применением методики расчета железобетонных конструкций по аналогии с шарнирными фермами

но были установлены каждый из 18 постоянных анкеров фундаментом канатов оттяжек, затем — опалубка и арматура, после чего было произведено бетонирование ростверки. При этом с высокой точностью прошли установка и временное закрепление высокопрочных стержней предварительно напряженных анкеров.



**Рис. 14. Монтаж центральной секции пролетного строения плавучим краном**

После завершения бетонирования фундаментов оттяжки были натянуты и закреплены первые шесть постоянных анкеров. Для того, чтобы не возникло чрезмерно высокое давление грунта, предварительное напряжение анкеров в ходе строительства проводилось в три стадии

### **Подготовка и сборка металлоконструкций**

Пролетное строение состоит из 51 блока. Блоки длиной 3 м сваривали из панелей со строгим соблюдением сложной геометрии. Далее в заводских условиях блоки укрупняли в секции в основном по 8 штук и в таком виде доставляли на стройплощадку.

Закладные детали устоев были установлены в проектное положение и забетонированы, при этом 6 оставшихся блоков пролетного строения подвергли дополнительному укрупнению на берегах канала: первую секцию установили на подмости в проектное положение и полностью приварили к металлоконструкциям южного устоя. Размещенные на южном берегу секции со второй по четвертую сваривали в единую кон-

струкцию, которая составила среднюю 90-метровую часть пролетного строения. Секции 5 и 6 сваривали вместе уже на северном берегу и также установили на подмости в положении, близком к проектному. мачту, изготовленную на заводе из двух частей, соединили сваркой на северном берегу.

Канаты системы подвески изготавливали с повышенной точностью (максимальный допуск составлял 0.1/1000), здесь также следует иметь ввиду то, что конструкция не предусматривает использование стяжных муфт или каких-либо иных устройств, позволяющих регулировать длину каната.

Для монтажа средней части пролетного строения длиной 90 м и весом 110 т потребовалось доставить на объект плавучий кран грузоподъемностью 300 т, в связи с чем судоходство на канале Рейн — Херне пришлось закрыть. Во избежание больших заторов судов, использующих канал, время его закрытия было ограничено 48 часами.

В самом начале монтажных работ первой установили мачту с монтажом оттяжек. Для удержания мачты в таком положении пришлось дополнительно установить две временные оттяжки.

Затем средняя часть пролетного строения была поднята краном и приварена к первой секции, уже прикрепленной к южному устою (рис. 14). После этого кран подал предварительно соединенные секции 5 и 6, после чего новый участок пролетного строения был приварен к средней части.

На последнем этапе монтажа полностью собранную балку пролетного строения, удерживаемую краном на весу и одним концом уже приваренную к южному устою, надлежало образом деформировали, привели в соприкосновение с соответствующими элементами северного устоя и приварили балку ко второму устою. После установки вспомогательного каната, который одним концом прикрепили к середине пролетного строения, а вторым закрепили на вершине мачты, плавучий кран был освобожден и покинул судовой ход канала. Пролетное строение, надежно установленное на двух прибрежных подмостях с серединой, подвешенной к мачте на вспомогательном канате, было, таким образом, подготовлено к монтажу системы подвески (рис. 15).

## Монтаж системы подвески

Оптимально рассчитанная длина вспомогательного каната, строго определенное положение вершины мачты и кронштейнов на канатах оттяжки на много упростили операцию монтажа канатов системы подвески.

Канаты разложили на секциях пролетного строения еще до его монтажа краном. Каждый из главных несущих канатов длиной 82 м были смотаны с транспортных барабанов и одним концом закреплены на вершине мачты.

До начала подъема пролетного строения стяжные хомуты канатов, канаты подвески и канат гирлянды были соединены между собой в соответствии с общей схемой.

## Натяжение канатов

При натяжении канатов системы подвески пролетное строение медленно оторвалось от подмостей и постепенно заняло горизонтальное положение с передачей собственного веса на систему канатов.

В течение этой операции, на первой стадии натяжения мачта наклонилась вперед приблизительно на 750 мм (относительно своего проектного положения). При этом кронштейны оказались на 600 мм выше своего проектного положения, а балка пролетного строения в середине пролета оказалась приблизительно на 300 мм выше проектной отметки.

Затем в пять ступеней были проведены следующие операции:

- кронштейны опустили приблизительно на 100 мм.

- вспомогательный канат, прикрепленный к вершине мачты, был демонтирован.

- вершину мачты, регулируя натяжение одного из первичных временных канатов, переместили назад точно в плоскость биссектрисы угла между проектными канатами оттяжек.

Как и ожидалось, после проведения вышеперечисленных операций, которые постепенно разгружали вспомогательные сооружения, один за другим, начиная с самых коротких, в работу вступили канаты подвесок, принимая на себя нагрузку и передавая ее на всю систему подвески.

После окончательного завершения натяжения канатов пролетное строение оторвалось от подмостей и заняло положение, приблизительно на 100 мм выше проектного. После чего были натянуты и закреплены шесть дополнительных постоянных анкеров.

## Финиш

После демонтажа подмостей и всех вспомогательных канатов забетонировали железобетонную плиту, пролетное строение опустилось (приблизительно на 300 мм) и заняло свое проектное положение, при этом натянулись последние, еще свободно висевшие до этого некоторые канаты подвесок. Шесть остающихся свободными постоянных анкеров были напряжены и закреплены, зазор между кронштейнами заполнен бетоном, стержни также напряжены.

Строительно-монтажные работы завершились установкой перильного ограждения с плетеной сеткой заполнения из нержавеющей стали и уклад-

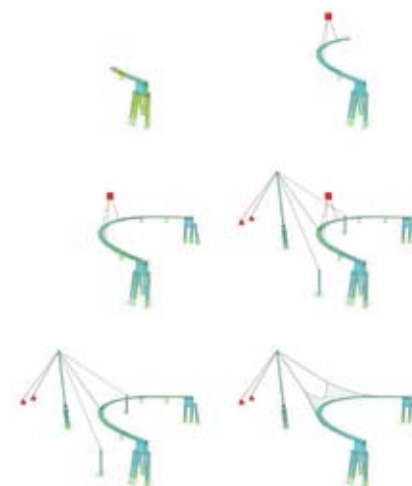


Рис. 15. Модель стадий монтажа пролетного строения для расчета методом конечных элементов

кой тонкого слоя асфальтового покрытия поверх железобетонной плиты.

Таким образом, в северной части немецкого города Гельзенкирхен и появился новый, кажущийся невесомым мост, скупые формы, элегантная геометрия и новые инженерные решения которого превращают его в объект повышенного внимания и интереса (рис. 16). Благодаря самоотверженному труду всех вовлеченных в работу специалистов, удалось успешно воплотить в жизнь сооружение, которое наглядно демонстрирует высокий уровень творчества и опыт в создании большепролетных пешеходных мостов.

**Андреас Кейль,  
Себастьян Линден,  
дипломированные инженеры-  
строители, компания Schlaich  
Bergemann und partner  
(Штутгарт, Германия).**



Рис. 16. Вид на мост с южного берега