

ОПЫТ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АРОЧНОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ АНДРЕЕВСКОГО МОСТА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ЕГО НА НОВОЕ МЕСТО



Кандидаты техн. наук В.К. Блохин, О.В. Крутиков, А.И. Марасанов, МИИТ

The experience of control of stress and strain state of Andreevskiy bridge arch span during its transportation to the new place.

Статья написана по результатам экспериментального (приборного) научно-технического сопровождения процесса перевозки в новый створ двухпутного стального арочного железнодорожного пролетного строения Андреевского моста в Москве. Основные технические параметры пролетного строения, проектные и технологические решения по проекту перевозки приведены в статье А.В. Островского и В.З. Рони-на «Новая жизнь Андреевского моста» («Транспортное строительство», № 11, 1999)

Работы по снятию пролетного строения распорной системы с опор и передаче его веса на плавучие опоры, перемещению пролета на новое место, установке пролетного строения на новые опоры представляли

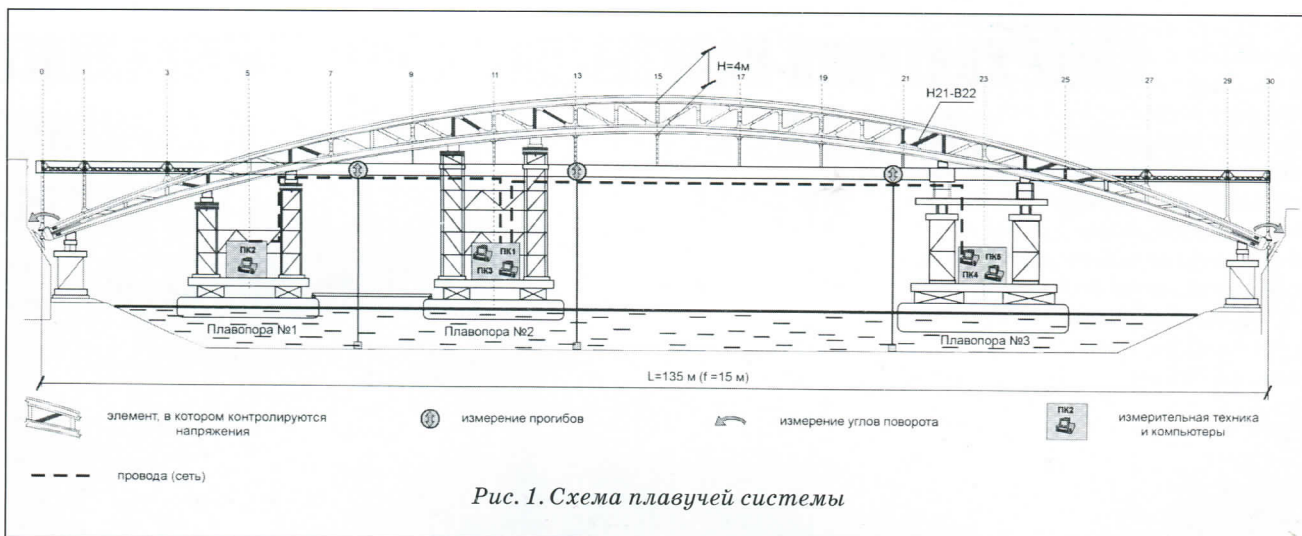
набор уникальных монтажных операций. Хотя мостостроители нашей страны имеют достаточный опыт перевозки на плаву мостовых конструкций различных типов и массой в несколько тысяч тонн, работа по перемещению на новое место арочной распорной конструкции проводилась впервые. Проект разработан ОАО «Гипростроймост» (главные инженеры А.В. Бобриков и А.В. Соловьев). Перевозка осуществлена на трех баржах-площадках по «несимметричной» схеме. Поэтому Правительство Москвы и Корпорация «Транстрой» приняли решение об организации научно-технического сопровождения процесса перевозки. Наблюдение за поведением арочного пролетного строения и узлов его опираний было поручено ООО «Товарищество кафедры «Мосты» МИИТа» («Т.К.М.»).

Запроектированное в начале века выдающимся мостостроителем профессором Л.Д. Проскуряковым пролетное строение с клепаными эле-

ментами и узлами было изготовлено из литого железа и рассчитано по нормам 1896 года. Перед перевозкой оно было тщательно обследовано.

Монтажные операции при переносе пролетного строения охватывали три основных этапа:

- Снятие пролетного строения со старых опор. При этом вес пролетного строения передается на плавучие опоры. Включение плавучих опор в работу происходит при откачке балласта (воды) из отсеков барж («дебалластировка»). Отделение арки от опор предусматривалось по регулировочным клиньям между нижними балансирными опорами частей и опорными плитами (балансиры были стянуты временными тросами).
- Транспортировка пролетного строения к новому месту в безраспорном состоянии (по балочно-консольной схеме).
- Установка арки на новой оси с восстановлением ее исходной гео-



метрии и распора. Опускание и передача веса с плавучих опор на новые опоры обеспечивались при заполнении отсеков барж балластом («балластировка»).

Основные монтажные операции были выполнены в период с 19 по 24 мая 1999 года.

Плавучие опоры представляли собой баржи-площадки с надстройками башенного типа из мостовых инвентарных конструкций МИК-С и МИК-П, выполненных из стали 10ГС и 15ХСНД. Грузоподъемность барж, использованных для плавопор 1 и 2 — 1200 тс, а для плавопоры 3 — 3000 тс. Баржи были ориентированы вдоль реки. Баржи опор 1 и 2 были объединены между собой двумя горизонтальными фермами.

Транспортировка плавучей системы осуществлена шестью буксирами мощностью 200–500 лс. Вывод плавучей системы с оси старого моста и точную наводку на ось нового моста вели при помощи лебедок.

Проведенные в процессе проектирования и подготовки приборного контроля расчеты показывали, что особенностью поведения пролетного строения на этапе снятия являлось одновременное исчезновение горизонтальной (распора) и вертикальной составляющих опорных реакций в ходе передачи веса на плавучие опоры. Снижение распора до нуля ожидалось до обнуления вертикальных составляющих реакций. В смысле деформаций это означало определенное сокращение пролета

арки (сближение опорных узлов) к моменту полного исчезновения реакций на устои. Ответственным моментом было состояние пролетного строения при значительном отрицательном распоре, когда при продолжении нарастания опорных реакций на плавопоры опорные шарниры не выключаются из работы.

Для контроля за напряженно-деформированным состоянием пролетного строения при указанных монтажных операциях специалисты ООО «Т.К.М.» применили экспериментально-измерительный комплекс, который позволял не только быстро проводить необходимые замеры, но и оперативно их обрабатывать, сравнивать с расчетными данными, выявлять неблагоприятные или опасные изменения определенных параметров, оперативно оповещать руководителей работ о ходе монтажных операций и соответствующих отклонениях. При этом использовались данные по напряженно-деформированному состоянию пролетного строения, полученные специалистами ОАО «Институт Гипростроймост» на основе пространственного расчета плавучей системы с использованием конечно-элементного комплекса «Катран».

Напряжения (приращение напряжений относительно момента начала измерений) в элементах арок и плавучих опор и перемещения ряда узлов пролетного строения определялись измерениями с помощью

тензодатчиков. Общая схема измерительной системы представлена на рис. 1.

В арочном сквозном пролетном строении контролировалось 28 элементов. На элемент устанавливали по 2 и 4 датчика, что давало возможность выделить напряжения от нормальной силы и изгибающих моментов. Для контроля вертикальных реакций в узлах опирания пролетного строения на временные опоры тензодатчики устанавливали на пояса изгибаемых пакетов надстроек плавучих опор. Применены термокомпенсированные фольговые тензодатчики фирмы НВМ (ФРГ), а также монтажные материалы этой же фирмы — клей и полиуретановое защитное покрытие. Всего на пролетном строении и плавучих опорах для статических измерений было размещено 152 тензодатчика (120 измерительных каналов). Для сбора сигналов тензодатчиков применена измерительная тензометрическая система из трех комплектов на базе СИИТ-3. Общая длина кабелей при статических измерениях составила около 1,9 км.

Опрос датчиков производился автоматически под управлением персональных компьютеров, подключенных к измерительной системе. Ввод данных механических приборов, обработка данных и анализ результатов были распределены между участниками испытаний, управлявшими четырьмя персональными компьютерами (ПК1-ПК4). На ком-

пьютерах ПК1–ПК3, установленных на каждой из плавопор, вводили данные и вели их первичную обработку. Обобщающий анализ результатов измерений выполнялся на ПЭВМ, установленной на плавопоре 2 (ПК1). Для обмена информацией между компьютерами на плавучей системе была организована локальная компьютерная сеть.

На этапах снятия и установки пролетного строения измеряли вертикальные и горизонтальные перемещения узлов арок. Механические прогибомеры устанавливали в узлах Н8, Н13 и Н21, а также в опорных узлах арки. Углы поворота в опорных шарнирах в процессе дебалластировки измеряли индикаторными головками часового типа.

Для связи между всеми участниками испытаний использовали возможности компьютерной сети, а также носимые радиостанции.

При длительных испытаниях, проходящих в течение нескольких суток, необходимо учитывать изменение температуры, приводящее к деформации пролетного строения и «дрейфу нуля» при снятии отсчетов. Изменение температуры, фиксировавшееся измерительной системой, было существенным: максимальная разность температур во время испытаний составила 21 °С. На основе полученных данных по изменению температуры были откорректированы отсчеты каждого канала измерительной системы.

Измерительная система позволила контролировать деформации пролетного строения и напряжения в наиболее нагруженных (критических) элементах на протяжении всего периода монтажных операций от начала передачи веса на плавучие опоры (дебалластировка) до полной установки пролетного строения на новое место.

Примеры графиков изменения осевых и изгибных напряжений в элементах решетки пролетного строения даны на рис. 2. По оси абсцисс отложены моменты времени, соответствующие моментам опроса датчиков. Представлены результаты измерений, выполненных на протя-



Рис. 2. Изменение напряжений от нормальной силы σ_N и изгибающего момента σ_M в элементах нижней арки, МПа

жении всех испытаний, от начала дебалластировки до полного выключения плавучих опор.

Наиболее нагруженными являлись элементы, расположенные в зоне опирания пролетного строения на плавучую опору 3. Экспериментальные напряжения (усилия) по отношению к расчетным составили для исследованных элементов 47–95%.

Примеры графиков вертикальных перемещений узловых точек пролетных строений и углов поворота опорных узлов пролетного строения приведены на рис. 3.

График изменения опорных реакций в узлах плавучей опоры 3 приведен на рис. 6. В начальной и конечной точках графика вес пролетного строения воспринимался постоянными опорами, а в среднем участке графика — плавучими.

Измерения в процессе монтажных операций показали, что никаких отклонений в поведении конст-

рукций не было: в рассматриваемых элементах измеренные напряжения не превысили расчетных.

Вместе с тем полученный массив экспериментальных данных позволил провести достаточно интересное исследование поведения уникальной мостовой системы в сложных условиях нагружения, оценить соответствие реальной работы конструкции и модели, используемой при расчетном анализе пролетного строения.

В основу исследования была положена расчетная модель арочного пролетного строения (рис. 5) — плоская, физически и геометрически линейная. Узлы приняты жесткими. Закрепления на устоях — шарнирные. Механические характеристики элементов пролетного строения, топология и координаты узлов, а также другие исходные данные для расчета приняты по данным обследований и по проекту. Расчеты выпол-



Рис. 3. Изменение угловых (φ) и линейных (Δ) перемещений узлов нижней арки при дебалластировке



Рис. 4. Изменение суммарных реакций при дебалластировке (20-21 мая), КН

нялись по программе GER, разработанной на кафедре «Мосты» МИИТа.

С использованием модели проведена расчетная оценка усилий в элементах, перемещений узлов, реакций на постоянные опоры, наблюдавшихся на всех стадиях монтажа. В качестве исходных данных взяты полученные экспериментально характеристики α_i напряженно-деформированного состояния пролетного строения (фиксируемые характеристики) — усилия в элементах решетки главных ферм, перемещения узлов, на основе которых формировался вектор α . Решение сводилось к определению вектора Q равнодействующих реакций в плавающих опорах, представленного силовыми факторами $Q_1=P_1+P_2$; $Q_2=P_3+P_4$; $Q_3=P_5+P_6$.

Использовался метод наименьших квадратов, который при данной постановке задачи в случае, если число измеренных характеристик напряженно-деформированного состояния системы превышает число неизвестных внешних сил Q_i , дает однозначное решение.

Алгоритм, реализующий опреде-

ление вектора Q , следующий:

- а) экспериментально измеряются α_i ;
- б) формируется матрица влияния A , каждый элемент δ_{ij} которой представляет i -ю фиксируемую характеристику, полученную расчетом от воздействия единичного силового фактора Q_j ;

в) вычисляются компоненты вектора сил

$$Q = [A^T A^{-1}]^{-1} A^T \alpha. \quad (1)$$

Учет температурного воздействия, а также изменения длины арки проводился уточнением компонент вектора α на основе принципа независимости действия сил:

$$\alpha_i = \alpha_{i,uzm} - \alpha_{i,t} - \alpha_{i,l}, \quad (2)$$

где $\alpha_{i,uzm}$ — фиксируемая характеристика напряженно-деформированного состояния системы, полученная экспериментально;

$\alpha_{i,t}$ — составляющая фиксируемой характеристики, получаемая за счет изменения температуры системы на величину t ;

$\alpha_{i,l}$ — составляющая фиксируемой характеристики, получаемая за счет взаимного сближения опорных узлов системы по горизонтали

на величину l .

Величины $\alpha_{i,t}$ и $\alpha_{i,l}$ определялись по формулам: $\alpha_{i,t} = \delta_{i,t} t$ и $\alpha_{i,l} = \delta_{i,l} l$.

Здесь $\delta_{i,t}$ — значение i -й фиксируемой характеристики при нагреве системы на $1^\circ C$;

$\delta_{i,l}$ — значение i -й фиксируемой характеристики при взаимном сближении опорных узлов системы по горизонтали на 1 м.

Значения фиксируемых характеристик $\delta_{i,t}$ и $\delta_{i,l}$ определены расчетом с использованием принятой модели.

Оценка реакций в плавопоре 3, полученная расчетом с использованием изложенного алгоритма, по осевым усилиям, возникшим в элементах главных ферм на всех этапах переноса пролетного строения, приведена на рис. 6 (пунктирные линии). При расчете использовались данные измерения напряжений в 28 элементах арок — по 14 на каждую арку (плоскость). Учтено температурное воздействие согласно (2). Корректировка с учетом изменения длины пролетного строения не производилась. Оценка равнодействующих опорных реакций в плавопорах приведена на рис. 4.

Расчетные значения реакций в временных опорах использованы для оценки изменения напряжений в элементах главных ферм и перемещений узлов пролетного строения (рис. 2, 3).

Следует отметить достаточно хорошее соответствие результатов непосредственного измерения и расчетной оценки с использованием экспериментально найденных усилий в элементах пролетного строения. Некоторые различия могут быть объяснены:

- возможным отклонением действительной температуры пролетного строения от принятой ее оценки, сказывающимся на точности корректировки температурного дрейфа показаний датчиков в элементах арок и точности учета температурной составляющей (2) в измеряемом усилии;

- неучетом изменения расчетной длины арок, происшедшего после снятия распора;

- неполным соответствием расчетной модели реальной работе

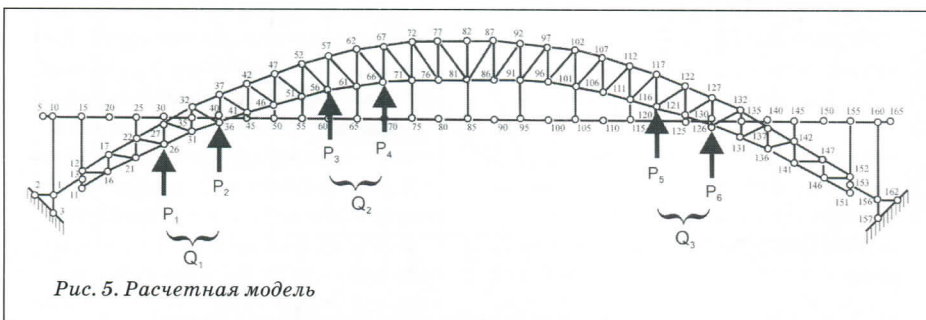


Рис. 5. Расчетная модель

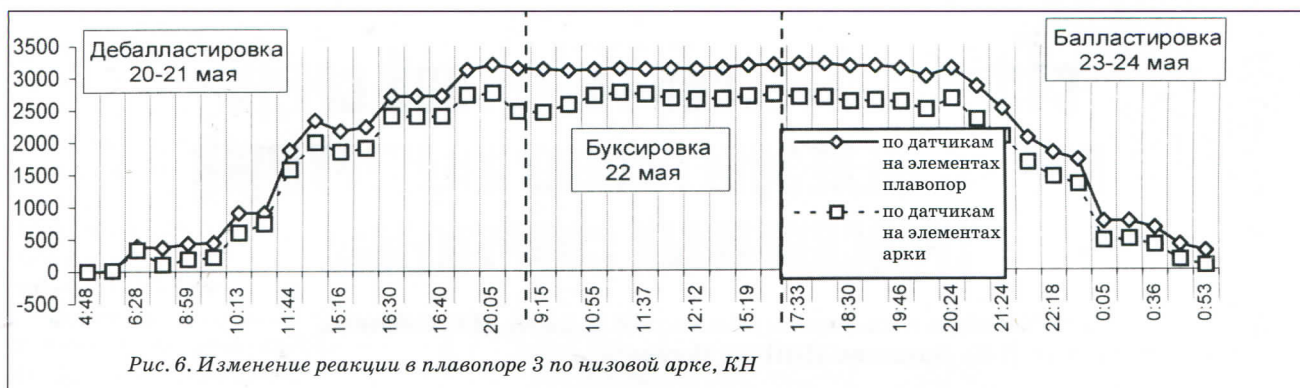


Рис. 6. Изменение реакции в плавопоре 3 по нижней арке, КН

конструкции на рассматриваемых этапах, связанным, например, с действительной частично заземленной работой опорных шарниров.

Расчетно-экспериментальные данные на основе измерения перемещений узлов показывают значительное худшее соответствие с другими вариантами оценки. Высокая чувствительность перемещений к воздействию температуры и изменению длины арок, более низкая представительность выборки (3–5 мест измерений на плоскость против 14 при использовании усилий в элементах), очевидно, являются этому причиной.

Вес каждой арки пролетного строения, определенный как среднее значение суммарных реакций по измерениям в период, когда плавучие опоры несут пролетное строение полностью, составляет 610–660 тс. Вес всего пролетного строения по результатам расчетов может быть порядка 1245–1275 тс.

Как показывают результаты измерений, в 14¹⁰ 20 мая — к моменту, когда появились свидетельства укорочения пролетного строения с отделением опорных узлов от устоев, вес пролетного строения был передан на плавучие опоры еще не полностью. Доля веса верхней арки, воспринятая плавопорами, составляла около 87% от оценки общего веса пролетного строения. Соответствующая часть веса нижней арки составляла 76%. Таким образом, как и предусматривалось проектом, момент обнуления распора наступил несколько раньше, чем полный вес пролетного строения был воспринят плавучими опорами.

В процессе дебалластировки

барж плавопор происходило снижение распора (горизонтальной составляющей реакции) Н, действующего со стороны устоев на пролетное строение. Величина изменения распора на за время от начала наблюдения до его обнуления определялась по формуле:

ответствует температуре в момент обнуления распора +10...+15 °С.

Таким образом для сложной конструкции плавучей системы при перемещении арочного пролетного строения Андреевского моста на трех плавучих опорах выполнен контроль напряженно-деформиро-

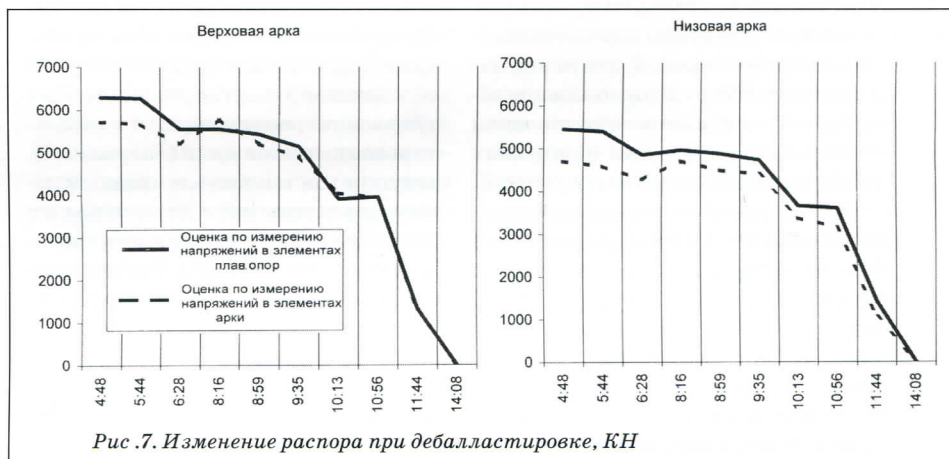


Рис. 7. Изменение распора при дебалластировке, КН

$$H = h^T Q,$$

где h — вектор, состоящий из компонент h_i , каждая из которых равна распору, вычисленному по программе GER при загрузке расчетной модели силой $Q_i=1$.

Графики изменения распора, полученные на основе экспериментальных данных по элементам плавопор и по элементам пролетного строения, представлены на рис. 7. Как видно из приведенных результатов, оценки изменения распора, выполненные указанными способами, являются достаточно близкими. Можно утверждать, что на момент начала наблюдений распор в верхней арке составлял 600–660 тс, а в нижней арке — 500–575 тс. Эта оценка со-

ответствует температуре в момент обнуления распора +10...+15 °С. Таким образом для сложной конструкции плавучей системы при перемещении арочного пролетного строения Андреевского моста на трех плавучих опорах выполнен контроль напряженно-деформиро-