

УДК 624.6:528.087

А.И. КУЗЬМИНЫХ, В.А. СИДОРОВ

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОСТА НА 16 км ЛИНИИ МОСКВА—КУРСК

В статье дано описание методики мониторинга напряженно-деформированного состояния металлического моста и приведены его основные результаты.

В течение 2008 г. сотрудниками лаборатории «Мосты» СГУПС выполнялись работы по мониторингу технического состояния пролетных строений и опор арочного моста 1-го и 2-го путей, опор существующего моста 3-го и 4-го путей, опор строящегося моста на 16 км линии Москва — Курск Московской железной дороги, а также оползневого склона правого берега р. Москва в районе строительства. Целью работы являлось предупреждение недопустимого ухудшения технического состояния мостовых конструкций из-за развития оползневых процессов в правобережном склоне р. Москва в период реконструкции мостовых переходов.

В процессе работы осуществлялись систематические геодезические наблюдения за планово-высотным положением опор мостов, измерения деформаций элементов пролетных строений арочного моста, расчеты напряженно-деформированного состояния элементов пролетного строения арочного моста, а также наблюдения за состоянием оползневого склона правого берега р. Москва.

Арочный мост на 16 км линии Москва — Курск был запроектирован под два пути по схеме 16 + 151 + 16. Два крайних пролетных строения представлены железобетонными балками, средний пролет — металлическая арка с затяжкой на неподвижных опорах. Мост был построен в период с 1940 по 1953 гг. Особенностью указанного арочного моста являлось то, что в период, прошедший с момента ввода его в эксплуатацию происходили вызванные оползевыми подвижками правобережного склона длительные смещения 2-й опоры в сторону русла р. Москва, общая величина которого на начало 2008 г. составила около 300 мм.

Смещение опоры привело к возникновению нерасчетных усилий в элементах пролетного строения, поэтому важным элементом мониторинга явились периодические измерения расстояния между осями шарниров арки. Для измерений использовался высокоточный электронный тахеометр Leica TCR802 Power с паспортной погрешностью вертикальных и горизонтальных угловых измерений 2" и паспортной погрешностью измерения расстояний 2 мм + 2 ppm (по стандарту ISO 17123-3). Измерения производились по заранее нанесенным на поверхность шарниров насечкам встроенным инфракрасным лазерным дальномером в сочетании с отражательной призмой.

Для измерения расстояний между осями опорных шарниров была разработана специальная методика. Искомое расстояние определялось как сумма двух проложений, измеренных от прибора до засечек на шарнирах одной арки. Взятие отсчетов производилось со сменой круга, чем устранялась погрешность из-за коллимационной ошибки. Далее измерения аналогичным образом повторялись на другой паре опорных шарниров.

Тахеометр устанавливался на проекцию горизонтальной линии, соединяющей засечки на шарнирах так, чтобы ось прибора располагалась по возможности

более точно в створе между измеряемыми точками. Проверка правильности установки прибора на линию производилась путем взятия отсчетов по горизонтальному кругу при наведении прибора на засечки. При этом разница между отсчетами должна составить $180^\circ \pm \alpha$ (рис. 1). Для вычисления величины допуска α использовалась следующая методика. Задавался верхний предел погрешности, обусловленной отклонением точки стояния C от линии проекции, равный 0,1 мм (0,0001 м). Величина погрешности δ , равная разности между суммой длин отрезков AC и CB и длиной отрезка AB (L) и равна:

$$\delta = (a^2 + d^2)^{0,5} + ((L - a)^2 + d^2)^{0,5} - L \leq 0,0001, \quad (1)$$

где L — измеряемое расстояние; d — величина отклонения точки стояния от линии проекции; a — расстояние от точки стояния до одной из точек.

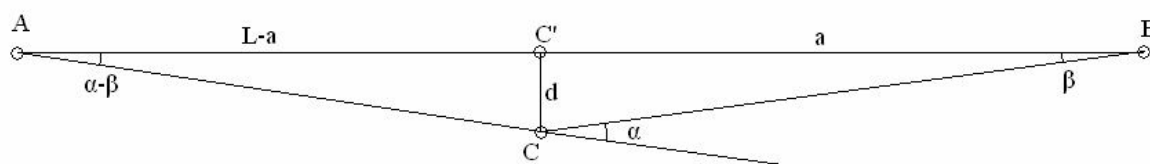


Рис. 1. Схема измерения расстояния между шарнирами опор арочного моста

С учетом малости отношения d/L и d/a условие (1) может быть с точностью до бесконечно малых величин второго порядка преобразовано в следующее:

$$a + d^2/2/a + L - a + d^2/2/(L - a) - L \leq 0,0001, \quad (2)$$

или, после сокращения и приведения подобных членов, в условие

$$d(d/a + d/(L - a))/2 \leq 0,0001, \quad (3)$$

$$d(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg}(\alpha - \beta))/2 \leq 0,0001. \quad (4)$$

Учитывая, что для малых углов тангенс угла с точностью до бесконечно малых величин второго порядка равен величине угла, выраженного в радианах, условие (4) может быть записано в следующем виде:

$$d\alpha/2 \leq 0,0001. \quad (5)$$

Поскольку отношение длин отрезков AC' и AB известно, то, обозначив его $k = a/L$, можно длину отрезка CC' с учетом малости углов α и β выразить в виде:

$$d = kL\beta = (1 - k)L(\alpha - \beta). \quad (6)$$

Приравняв (6) к (7), можно получить выражение для β в следующем виде:

$$\beta = \alpha(1 - k). \quad (7)$$

Подставив его в (6), получим

$$d = L\alpha k(1 - k). \quad (8)$$

Таким образом, условие (4) можно привести к виду:

$$L\alpha^2 k(1 - k)/2 \leq 0,0001, \quad (9)$$

откуда можно найти условие для предельного значения угла α :

$$\alpha \leq (0,0002/(Lk(1 - k)))^{0,5}. \quad (10)$$

Учитывая, что величина L составляет 151 м, а отношение длин отрезков a и L равно: $k = 16/151 = 0,1060$, получим значение предельной невязки отсчетов по горизонтальному кругу:

$$\alpha \leq 0,0002/(151 \cdot 0,1060 \cdot 0,8940)^{0,5} = 0,003739 \text{ рад, или } \alpha \leq 0,213^\circ. \quad (11)$$

Условие (11) гарантирует, что погрешность измерения из-за отклонения точки установки прибора от линии створа не превысит 0,1 мм.

Диаграмма изменения расстояний между осями шарниров за период с октября 2006 г. по ноябрь 2008 г. приведена на рис. 2.

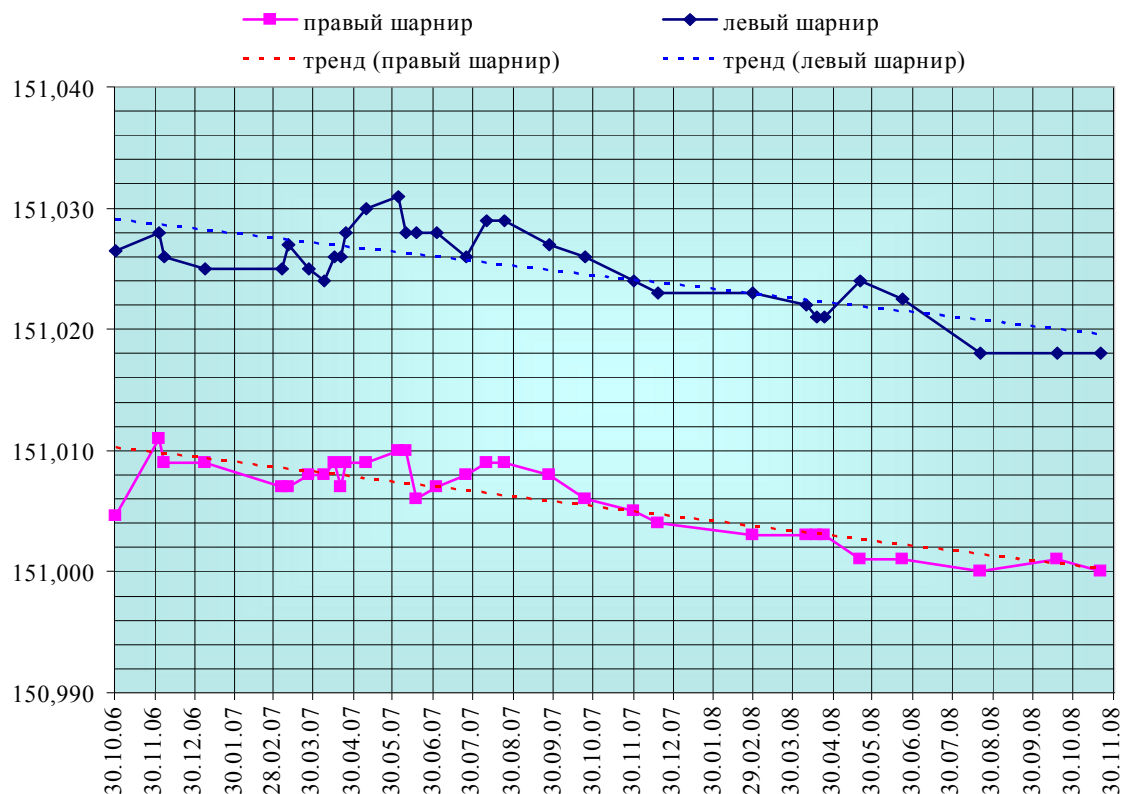


Рис. 2. Диаграмма изменения расстояний между осями шарниров

Как видно из рис. 2, наблюдается устойчивая тенденция уменьшения расстояния между осями опорных шарниров арочного моста.

Наблюдения за положением опор арочного моста 1-го и 2-го путей, существующего моста 3-го и 4-го путей, а также строящегося моста осуществлялись путем периодического измерения планово-высотного положения геодезических марок, установленных на опорах указанных мостов (рис. 3–5). В качестве постоянных реперов (твердых точек) использовалась реперная сеть, обустроенная геодезической службой подрядной организации (УСК «Мост»). Измерения производились с помощью высокоточного электронного тахеометра Leica TCR802 Power.

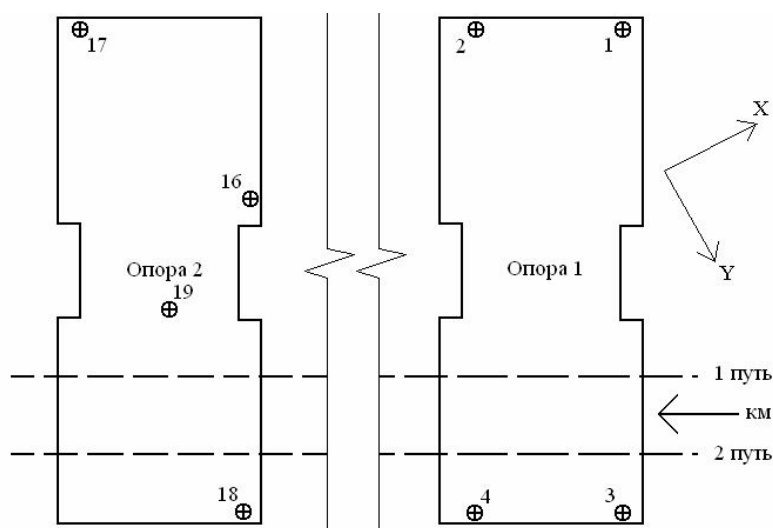


Рис. 3. Схема расположения марок на опорах арочного моста 1-го и 2-го путей

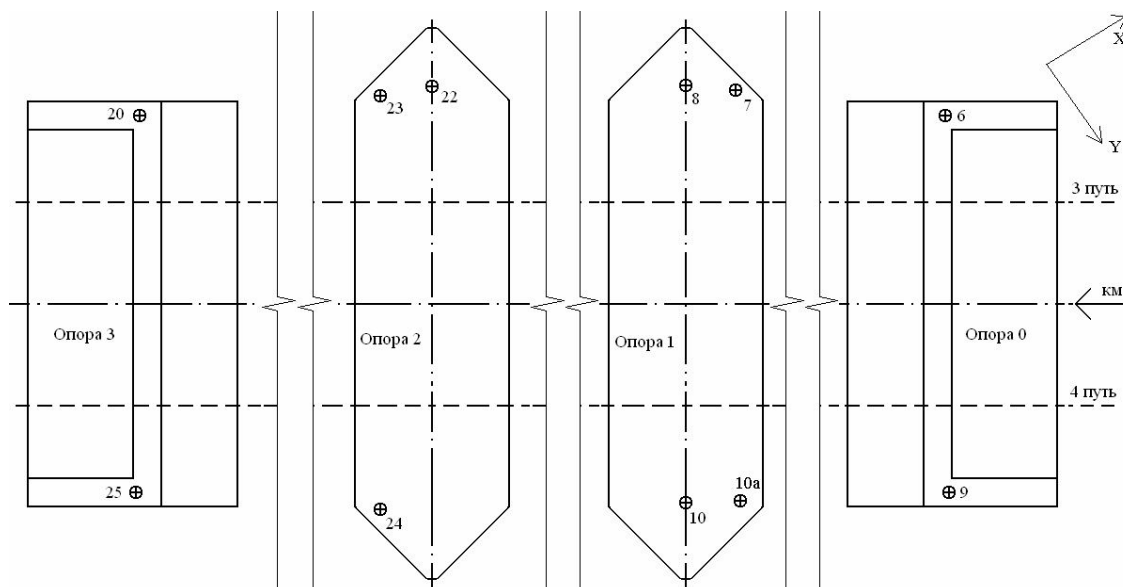


Рис. 4. Схема расположения марок на опорах моста 3-го и 4-го путей

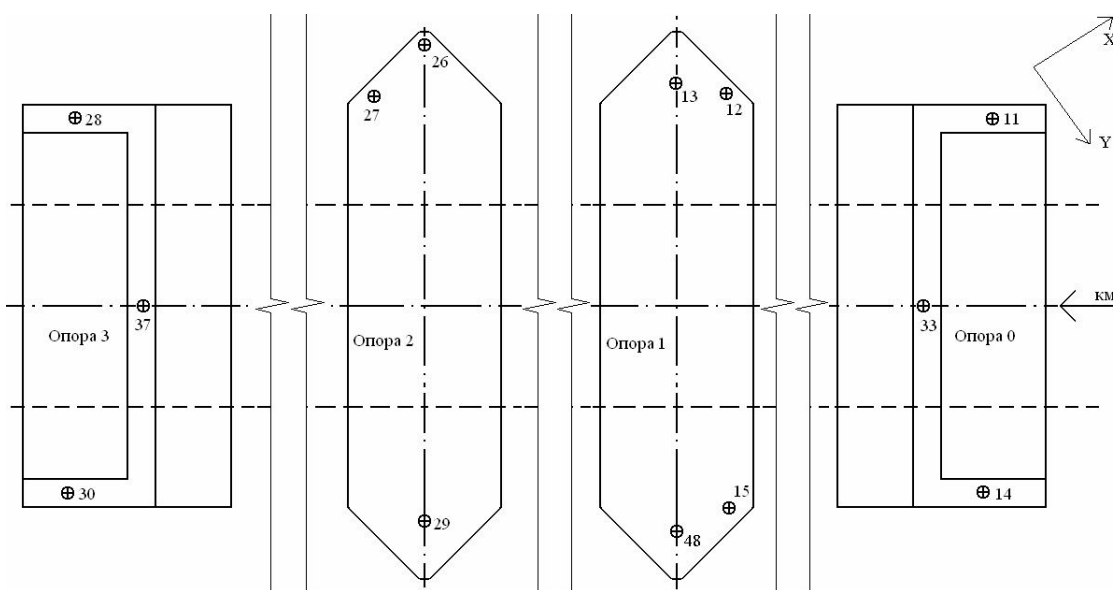


Рис. 5. Схема расположения марок на опорах строящегося моста

В результате измерений установлено, что за период наблюдений с апреля по декабрь 2008 г. выявлены смещения точки № 18 (+5 мм и +2 мм вдоль осей X и Y соответственно), а также в меньшей степени точки № 19 (+3 мм и +2 мм вдоль осей X и Y соответственно). На основании измерений можно сделать вывод о том, что опора № 2 арочного моста за период наблюдений несколько сместилась в плане. Характер смещения может быть определен в основном как вращательно-поступательный. Вращение происходит вокруг собственной вертикальной оси в направлении против часовой стрелки (при взгляде сверху). Поступательное перемещение направлено вдоль оси моста с некоторым отклонением к северу (к оси X).

В результате выполненных в 2008 г. измерений пространственного положения марок на опорах моста 3-го и 4-го путей, а также строящегося моста сколь угодно значимых смещений опор не выявлено, полученные величины отклонений находятся в пределах точности измерений.

Для наблюдений за смещениями оползневого массива на правом берегу р. Москва в районе строительства мостового перехода была оборудована наблюдательная сеть марок, установленных в наиболее характерных точках склона (рис. 6).

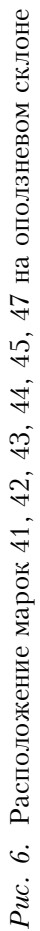
Анализ данных измерений положения марок на оползневом склоне позволил установить наличие устойчивой тенденции постепенного смещения части оползневого массива преимущественно в сторону р. Москва (на северо-восток). Так, например, точка № 42 сместилась в плане вдоль оси X (на север) на 29 мм, вдоль оси Y (на запад) на 10 мм, при вертикальном смещении (вниз) на 291 мм. Точка № 43 сместилась в плане вдоль оси X (на север) на 28 мм, вдоль оси Y (на запад) на 9 мм, при вертикальном смещении (вниз) на 50 мм. Точка № 44 сместилась в плане вдоль оси X (на север) на 59 мм, вдоль оси Y (на восток) на 6 мм, при вертикальном смещении (вниз) на 31 мм. Точка № 45 сместилась в плане вдоль оси X (на север) на 35 мм, вдоль оси Y (на запад) на 5 мм, при вертикальном смещении (вниз) на 15 мм. Смещения остальных точек незначительны.

При визуальном осмотре поверхности склона в июне 2008 г. были выявлены вновь образовавшиеся трещины глубиной до 0,8 м, длиной около 14 м, охватывающие массив грунта на склоне вблизи точек № 42, 43, 44 (рис. 6). Характер трещинообразования согласуется с характером перемещений марок. Появление трещин может быть объяснено производством земляных работ при устройстве лоткового быстрого тока ниже по склону в непосредственной близости от указанного места. При последующих обследованиях данного места, производившихся уже после засыпки пазух лотков, существенного увеличения глубины и раскрытия трещин не выявлено.

Для наблюдения за изменением деформаций элементов арочного пролетного строения в наиболее характерных элементах были оборудованы специальные точки. На рис. 7 приведена схема расположения указанных точек. Для измерения деформаций в этих точках арочного пролетного строения были по шаблону высверлены пары глухих отверстий диаметром 3 мм и глубиной 10 мм, позволяющие измерить с помощью компаратора изменение расстояний между точками сверления с точностью до 0,002 мм (рис. 8, 9). Систематические измерения расстояний между отверстиями позволили определить деформации элементов в процессе эксплуатации и, следовательно, вычислить соответствующие этим деформациям напряжения.

Точки наблюдения были оборудованы на левом и на правом поясах арки. На каждом поясе в каждой точке наблюдений были просверлены по четыре пары отверстий: две по низу сечения (основное и дублирующее), две по верху. Дублирующие отверстия были просверлены для контроля правильности измерений и исключения ошибок.

Измерения на каждой паре точек производились дважды, сначала при положении индикатора A (к Москве), затем при положении B (к Курску). Перед каждым измерением фиксировалась температура металла для учета поправок, возникающих из-за температурного расширения металла.



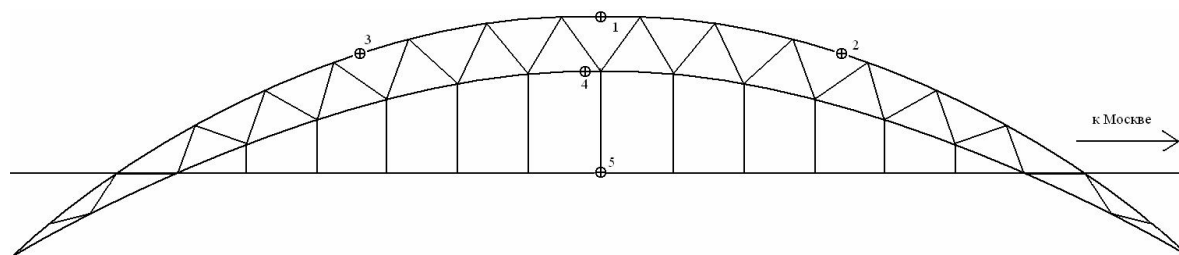


Рис. 7. Схема расположения точек измерения напряжений в элементах арки

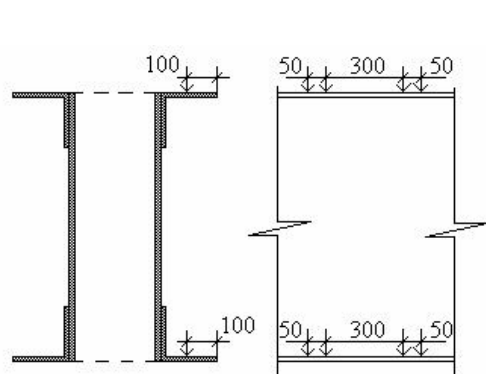


Рис. 8. Схема расположения точек сверления в затяжке

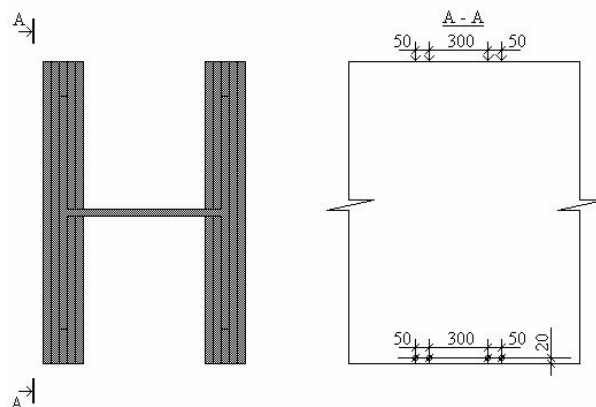


Рис. 9. Схема расположения точек сверления в элементах верхнего и нижнего пояса

В результате наблюдений установлено, что напряженное состояние элементов пролетного строения арочного моста с апреля по ноябрь 2008 г. претерпело некоторые изменения. В середине верхнего пояса напряжения изменились неравномерно. В правой арке напряжения изменились в сторону растяжения на $24,5 \text{ кг/см}^2$, в то время как в левой арке напряжения изменились в сторону растяжения на $1,5 \text{ кг/см}^2$. В четверти арки, ближней к центру Москвы, напряжения изменились в сторону растяжения: на $58,5 \text{ кг/см}^2$ в правой арке и на $53,2 \text{ кг/см}^2$ в левой. В четверти арки, дальней от центра Москвы, напряжения изменились незначительно по сравнению с предыдущей точкой: на $40,5 \text{ кг/см}^2$ и на $49,5 \text{ кг/см}^2$ в сторону растяжения в правой и левой арках соответственно. В середине нижнего пояса арки напряжения изменились в сторону сжатия на $42,0 \text{ кг/см}^2$. Наиболее существенно напряжения изменились в затяжке (точка № 5): на $51,0 \text{ кг/см}^2$ и на $75,8 \text{ кг/см}^2$ в сторону сжатия справа и слева соответственно.

Причинами неравномерного изменения напряжений в элементах арки, по нашему мнению, являются следующие факторы. Поскольку арка претерпела в течение периода эксплуатации существенные деформации, обусловленные смещением опор, это привело не только к возникновению дополнительных усилий, но также и к изменению схемы работы из-за стеснения элементов затяжки при смыкании температурных зазоров. В результате этого возросла чувствительность конструкции арки не только к смещению опор, но также и к температурным воздействиям. При уменьшении температуры происходит уменьшение размеров элементов, что влечет уменьшение стеснения конструкции вплоть до частичного или даже полного раскрытия зазоров, сомкнутых в период высоких летних температур, и, соответственно, к уменьшению усилий сжатия в стеснен-

ных элементах и перераспределению усилий в других. Другими существенными факторами являются действие ветровой нагрузки на пролетное строение, а также дополнительное смещение фундаментов опорных шарниров, зафиксированное в период с июня по август.

Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния элементов пролетных строений арочного моста осуществлялось с целью определения напряжений в элементах, обусловленных как расчетной схемой арки и действующими на нее расчетными нагрузками, так и дополнительными факторами, каковыми являются смещение опорных частей, а также изменение расчетной схемы из-за смыкания температурных зазоров и последующей дополнительной срезки металла в зазорах. При моделировании использовалась расчетная схема на основе метода конечных элементов, обеспечивающая возможность расчетной проверки прочности и устойчивости их элементов, определения линейных и угловых перемещений от комплекса нагрузок и воздействий, действующих в период эксплуатации, в том числе от смещения опорных шарниров.

Модель включала четыре вида элементов для моделирования стержневых элементов (ферм, продольных, поперечных связей, распорок и диагоналей), опор, сосредоточенных масс, зазоров в соединениях.

Нагрузки и воздействия на пролетное строение, учитываемые расчетной схемой, соответствовали перечню, приведенному в СНиП 2.05.03–84* «Мосты и трубы»:

- собственный вес конструкций;
- ветровая нагрузка;
- поездная нагрузка.

Вертикальная нагрузка от собственного веса определялась по проектным объемам элементов и частей конструкции, включая постоянные смотровые приспособления.

Ветровая нагрузка действует в плоскости, образованной осью стержня и вектором скорости ветра. Она направлена перпендикулярно к оси стержня и равна:

$$W_n = W_m + W_p. \quad (12)$$

где нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки W_m на высоте z над поверхностью воды или земли определяется по формуле

$$W_m = W_0 k C_w (\cos \alpha)^2, \quad (13)$$

где W_0 — нормативное значение ветрового давления (0,38 для г. Москва); k — коэффициент, учитывающий для открытой местности (типа А) изменение ветрового давления по высоте z , принимаемый по СНиП 2.01.07–85; C_w — аэродинамический коэффициент лобового сопротивления конструкций мостов; α — угол между направлением ветра и осью стержня.

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_p на высоте z определяется согласно СНиП 2.01.07–85:

$$W_p = W_m \xi L v, \quad (14)$$

где ξ — коэффициент динамичности; L — коэффициент пульсации давления ветра на уровне z ; v — коэффициент пространственной корреляции пульсации давления для расчетной поверхности сооружения.

Усилия от ветровых нагрузок в элементах продольных и поперечных связей между фермами пролетного строения определялись посредством пространствен-

ного расчета. Расчетная схема конструкции принята в соответствии с ее проектной геометрической схемой с учетом изменений, обусловленных смещением опор, смыканием температурных зазоров в затяжке и срезкой металла с торцов балок затяжки в температурных зазорах.

Усилия в элементах и перемещения стальных мостовых конструкций определялись из условия их работы с сечениями брутто. Для элементов, ослабленных отверстиями под обычные болты, при расчетах на прочность принимается сечение нетто, на устойчивость и жесткость — сечения брутто.

Проверка прочности и устойчивости элементов выполнялась согласно СНиП 2.05.03–84*.

Расчет производился с учетом включения в силовую схему продольных балок балочной клетки, а также уточненных данных о величинах зазоров в затяжке и продольных балках, полученных в результате обследования пролетного строения, выполненного в ноябре 2008 г.

Величины зазоров в температурных швах были приняты в соответствии с данными измерений величин срезки металла в указанных местах. Так, величины зазоров в правой затяжке были с учетом величины срезки металла с торцов балок приняты равными 75 мм (к Москве) и 120 мм (к Курску). Для правой затяжки соответствующие размеры были приняты равными 80 мм (к Москве) и 110 мм (к Курску).

Особого рассмотрения потребовал вопрос о назначении величин смещений опорных шарниров. На первый взгляд их следовало принимать равными измеренным величинам смещений. Однако при более внимательном подходе следовало учесть, что строительство правобережных опор и пролетного строения происходило с разрывом по времени в 12 лет. Поэтому можно уверенно предположить, что за период после строительства опор до сооружения пролетного строения они претерпели некоторое смещение. Величина этого первоначального смещения не оказывает существенного влияния на напряженное состояние элементов пролетного строения, поскольку после монтажа пролетного строения оно имело первоначальную форму и размеры, соответствующие изменившейся величине пролета. Величина этого первоначального смещения достоверно неизвестна, однако она достаточно точно может быть оценена косвенно на основании измеренных величин фактических зазоров, срезов, смещений балок затяжки и продольных балок. Учитывая, что суммарная величина остаточных зазоров в правой затяжке составляет 20 мм (в самом узком месте), суммарная величина срезки в ней равна 95 мм, а первоначальный суммарный зазор равен 100 мм, можно оценить смещение правого шарнира за период эксплуатации таким образом: $95 + 100 - 20 = 175$ мм. Аналогичная оценка для левого шарнира дала следующие числа: $90 + 100 - 5 = 185$ мм.

Таким образом, при расчете арки на смещения опор их следовало задавать равными 175 и 185 мм для правого и левого шарниров соответственно. Действительно, в случае задания полных величин смещений, расчетные усилия в затяжке оказываются чрезмерно большими, существенно превышающими предел текучести металла. При этом также полностью смыкались бы все зазоры в затяжке и продольных балках, что не соответствует фактическому состоянию зазоров, выявленному при обследовании пролетных строений.

Результаты расчета представлены на рис. 10–13.



Рис. 10. Расчетная схема арочного пролетного строения

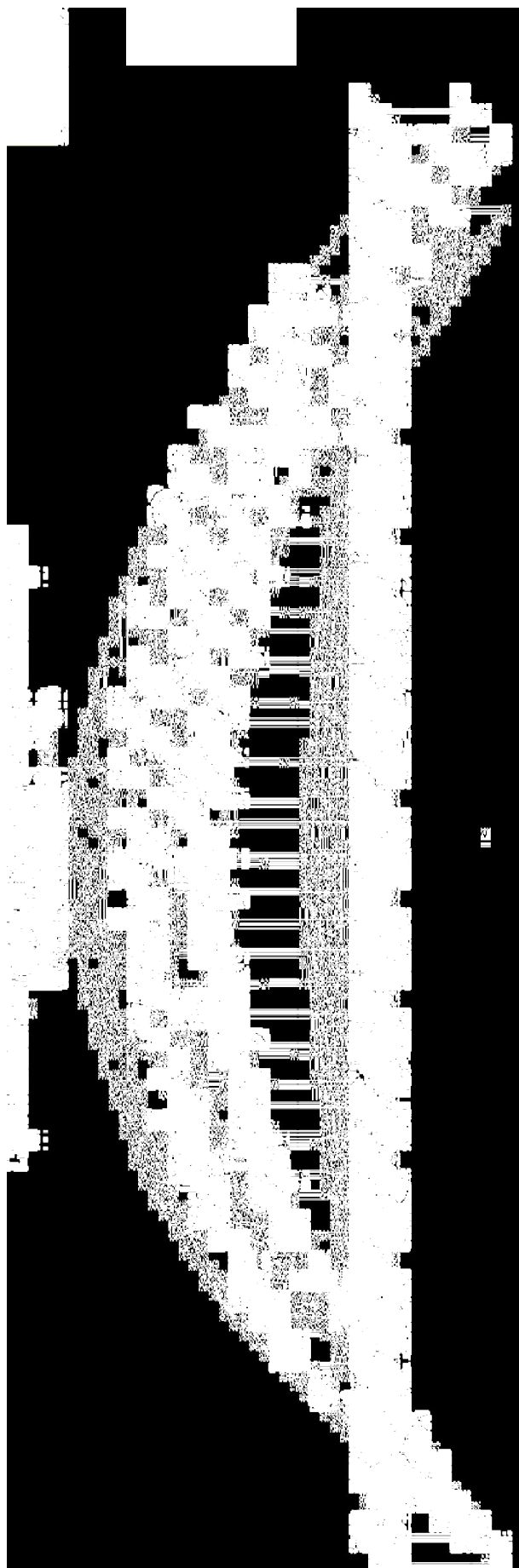


Рис. 11. Утрированная деформированная схема арочного пролетного строения при смещении правой опоры



Рис. 12. Диаграмма прогибов нижнего пояса пролетного строения при действии подвижной нагрузки и смещении правой опоры

Рис. 13. Диаграмма напряжений в элементах пролетного строения при смещении правой опоры

Анализ результатов расчета позволил оценить степень влияния смещения опорных шарниров, произошедшего за период эксплуатации моста, а также величин зазоров в затяжке и продольной балке на напряженное состояние элементов арки. Так, в элементах нижнего пояса наибольшие сжимающие напряжения составили 179 378 кПа. В элементах затяжки наибольшие сжимающие напряжения составили 144 155 кПа. В элементах раскосов наибольшие сжимающие напряжения составили 105 739 кПа, а наибольшие растягивающие напряжения — 171 768 кПа. В элементах продольных балок наибольшие сжимающие напряжения составили 91 679 кПа.

Следует отметить, что приведенные выше полученные в результате расчета величины напряжений существенно отличаются от проектных. Таким образом, смещение опор в сочетании со смыканием температурных зазоров в значительной степени исказило расчетную схему и привело к существенному изменению напряжений в основных несущих элементах. Следует также отметить, что все величины напряжений не достигают величины предельного напряжения стали Ст3, равной 206 010 кПа. Исключение здесь составляют элементы диагональных связей ветрового пояса, расчетные величины сжимающих напряжений в которых превысили предельные значения в два с лишним раза, что подтверждается фактом потери устойчивости одним из элементов этого типа. Согласно результатам расчета, учитывающим фактические величины зазоров (а также их увеличение) и фактические перемещения опорных частей, в элементах нижнего пояса напряжения составили 87 % от предела прочности стали Ст3. Во всех остальных элементах расчетные напряжения существенно меньше предела прочности, поэтому основная часть элементов арочного пролетного строения далека от исчерпания своего прочностного ресурса (за исключением элемента нижнего пояса арки Н14–16).