

В.Г. Пастушков, Г.П. Пастушков

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
БЕЗДИАФРАГМЕННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ
НА КРУПНОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЯХ**

Рассматриваются опытно-конструкторские и экспериментальные исследования работы пространственных моделей пролетных строений под движущимися внешними нагрузками до разрушения. Дается обоснование теоретических пространственных расчетных схем с определением неучтенных факторов напряженно-деформированного состояния конструкций.

***Ключевые слова:** пролётное строение, пространственные модели, мостовые сооружения, внешние нагрузки.*

Пространственный расчет пролетных строений мостовых сооружений состоит в определении внутренних усилий и перемещений в сечениях составляющих конструктивных элементов с учетом их взаимодействия при работе под движущимися внешними нагрузками.

Хотя существует большое число методов расчета конструкций, особенности работы мостовых сооружений и их элементов под действующими нагрузками в реальных условиях еще недостаточно изучены. Принимаемые для упрощения пространственных расчетов различные гипотезы не позволяют учесть ряд факторов напряженно-деформированного состояния конструкции и тем самым снижают достоверность результатов. Эффективность мостовых конструкций во многом будет зависеть от прогресса в области их расчета.

Применяемые для пролетных строений мостовых сооружений несущие конструкции можно рассматривать как континуальные, дискретные и дискретно-континуальные системы. Выбор расчетной модели для пролетных строений – достаточно сложная задача, при решении которой во многих случаях требуются теоретические и экспериментальные исследования.

Пожалуй, ни в одной другой отрасли строительства не проводятся столь обширные натурные испытания, как в мостостроении.

Обследования и испытания, выполняемые после завершения строительства (при приемке сооружений в постоянную или временную эксплуатацию), после реконструкции (усиления), также могут использоваться при обследованиях и испытаниях конструкций сооружений, находящихся в эксплуатации, при соблюдении технических регламентов [1]. Обследования и испытания (обкатка) проводятся для выявления состояния и работы под нагрузкой мостов с целью определения условий их эксплуатации. Испытаниям при приемке в эксплуатацию должны, как правило, подвергаться мосты с опытными и впервые применяемыми конструкциями и с пролетами свыше 100 м. Все остальные вводимые в эксплуатацию и не подвергаемые испытаниям мосты должны быть обкатаны.

В настоящее время наиболее актуальным для Республики Беларусь является не строительство новых, а обновление путем реконструкции эксплуатируемых мостов. Успешное решение этой проблемы состоит в разработке, теоретическом и экспериментальном обосновании и внедрении в практику строительства эффективных конструктивно-технологических систем реконструкции мостовых сооружений с максимальным использованием существующих конструктивных элементов сооружений и их несущей способности. Целесообразность такого решения подтверждается и экономически, так как стоимость реконструкции, хотя и требует значительных капитальных вложений, как правило, в 4...5 раз меньше стоимости строительства нового мостового сооружения. Поэтому особую важность приобретают решение вопросов придания мостовому сооружению требуемых параметров, вскрытие и оценка действительных резервов несущей способности эксплуатируемых конструкций. Часто правильный учет пространственной работы пролетных строений на основе современных компьютерных технологий позволяет обойтись без усиления конструктивных элементов мостовых сооружений и достигнуть существенного экономического эффекта.

Однако натурные испытания пролетных строений очень трудоемки, и на них, как правило, невозможно проведение детальных исследований. Для железобетонных пролетных строений современными нормами допускаются расчеты в предположении линейной упругости материалов.

Испытания натуральных конструкций проводятся лишь в начальной стадии их работы, а испытательные нагрузки часто отклоняются от

нагрузок, по которым это пролетное строение рассчитывалось. Поэтому весьма рациональным способом исследования конструкций, их развития и проектирования является моделирование, а теоретические исследования, выполненные в предположении упругих свойств материалов, целесообразно объединить с экспериментальными исследованиями на моделях.

Оба метода исследований – аналитический и экспериментальный – дают возможность правильно представить работу сложных пространственных систем.

Моделирование широко используется в исследованиях вопросов гидравлики, самолетостроения и лишь сравнительно недавно стало использоваться и в строительном проектировании [2, 3].

Методы исследований на моделях позволяют избежать многих трудностей, заложенных в теоретических исследованиях. На моделях можно исследовать конструкции с совершенно правильными граничными условиями, сложных геометрических форм и состоящих из материалов со свойствами, которые трудно выразить точными математическими формулами. Исследования на моделях позволяют провести более глубокие и обширные экспериментальные работы, чем на натуральных испытаниях, установить характер трещинообразования и выявить механизмы разрушения сложных пространственных систем.

Исследования на моделях ставят различные задачи. В зависимости от этих задач испытания на моделях можно разделить на три группы

Первые две группы посвящены исследованию работ конструкций в упругой стадии с качественной оценкой их поведения. Эти исследования применяются для проверки уже разработанных способов расчета либо для создания новой, более совершенной методики расчета, а также для разработки приближенных методов расчета.

Модели в упругой стадии выполняются на моделях из любого пригодного изотропного материала с линейной упругостью.

Очень часто для изготовления моделей первой группы применяются различные пластмассы. К методам этой группы относится метод фотоупругости.

Для изучения трехмерных конструкций путем измерения деформаций с помощью датчиков сопротивления, индикаторов, прогибомеров и др. служат методы второй группы. Исследования работы пролетных строений на моделях из органического стекла [4], проведенные в лаборатории СоюздорНИИ, показали достаточно хорошее

совпадение опытных и теоретических данных. Однако полученные из таких опытов результаты относятся не к натуре, а к ее расчетной схеме и не учитывают многих деталей железобетонных конструкций, которые плохо подчиняются теоретическим положениям, основанным на теории упругости.

Модели третьей группы приближаются к реальному сооружению, и данные, полученные при испытании таких моделей, гораздо ближе к истине, чем результаты, полученные при испытании моделей первых двух групп.

Законы конструктивного подобия в настоящее время достаточно хорошо известны [5].

Геометрические и физические величины, а также компоненты напряженного состояния пролетных строений модели и натуре сведены соотношением вида

$$K_M = C_K \cdot K_N,$$

где C_K – константа или масштаб подобия; K_M – величина модели; K_N – величина натурной конструкции, соответствующая величине модели.

При использовании материала для модели с отличными от материала натурной конструкции модулями упругости и сдвига, а следовательно, и различными коэффициентами Пуассона $C_\epsilon = 1$, однако соотношение C_σ/C_ϵ должно быть постоянным. Для правильного подобия необходимо, чтобы напряжения, умноженные на масштаб подобия C_σ , и деформации, умноженные на масштаб подобия C_ϵ , давали характеристики с индикаторной кривой $\sigma - \epsilon$ для натурной конструкции, т.е. любые характерные особенности натурной конструкции должны быть правильно отражены в модели. Для полного подобия необходимо, чтобы масштаб относительных деформаций равнялся единице. Если индикаторные кривые $\sigma - \epsilon$ совпадают или характеристики этих кривых подобны, то можно получить подобие всех этапов работы конструкции вплоть до разрушения.

Как показывают многочисленные исследования, выполненные в нашей стране и за рубежом, при моделях не слишком малых (порядка $C_1 = 1/5$ и более) возможно предсказать деформацию, трещинообразование и прочностные характеристики большинства железобетонных конструкций без учета масштабных факторов.

В Белорусском национальном техническом университете проведены испытания серии крупномасштабных моделей бездиафрагменных пролетных строений длиной 24 м в $1/5$ натурной величины.

Для изготовления моделей пролетных строений за основной элемент была принята балка двутаврового несимметричного профиля. Размеры опытных балок модели соответствовали размерам типовых балок по типовому проекту 501-5, часть III, раздел А, уменьшенным в 5 раз.

Каждая опытная балка модели выполнялась предварительно напряженной. В качестве напрягаемой арматуры применялась проволочная арматура диаметром 5 мм класса В_p-II.

Армирование верхней полки вертикальной стенки и вутов выполнялось из проволоки класса В_p-I. Детали армирования балок показаны на рис. 1. Основные геометрические характеристики модели были подобны характеристикам реального пролетного строения длиной 24 м.

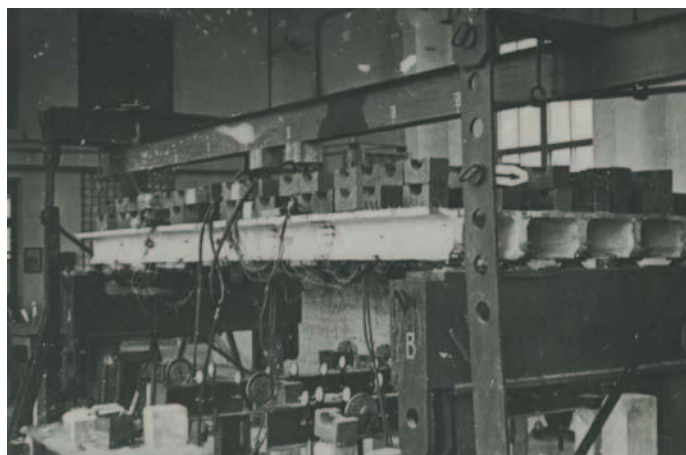


Рис. 1. Натурные испытания модели пролетного строения

Изготовление моделей производилось в лаборатории ОНИЛСК Белорусского национального технического университета (рис. 2). Объединение балок в пролетные строения производилось путем сварки выпусков арматуры из плиты с последующим замоноличиванием швов между балками.

Испытания отдельных балок и пролетных строений вертикальной нагрузкой на изгиб выполнялись при помощи установки, состоящей из тяг, прикрепленных к силовому полу и к поперечным траверсам. К поперечным траверсам прикреплялась распределительная домкратная при помощи болтовых тяг. Распределительную домкратную траверсу можно было перемещать по ширине пролетного строения. Схема

испытательной установки приведена на рис. 3. Такая конструкция установки позволяла создавать нагрузку в любой точке пролетного строения. Нагрузка создавалась при помощи 10-тонных гидравлических домкратов, которые располагались между верхней распределительной траверсой и испытываемыми конструкциями.

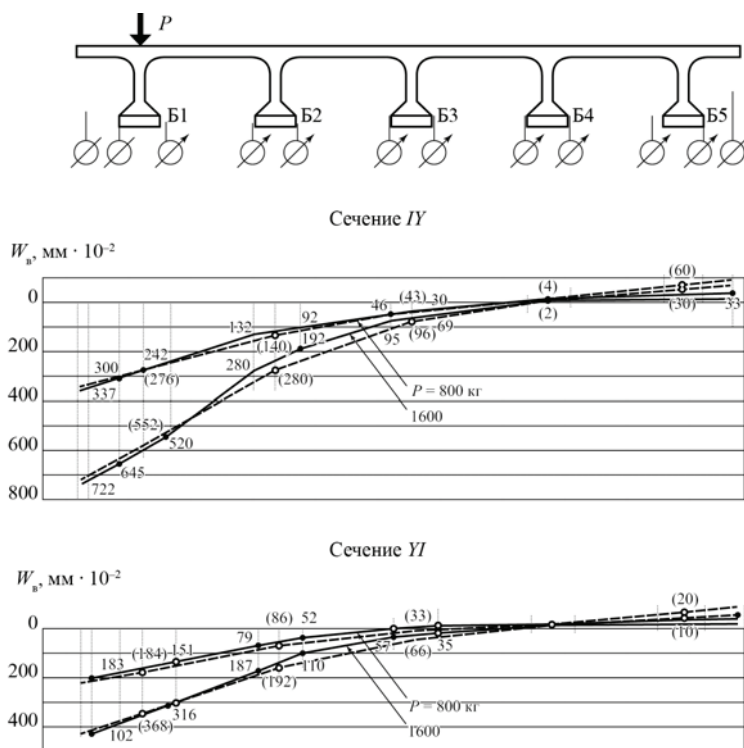


Рис. 2. Характер изменения прогибов по ширине пролетного строения. Экспериментальные данные, полученные в ходе испытания

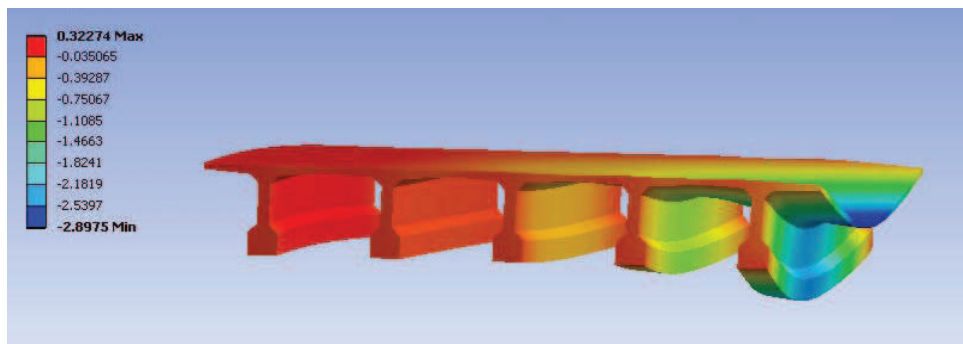


Рис. 3. Деформации объемной модели пролетного строения

Испытания проводились в следующей последовательности:

- статические испытания отдельных балок в упругой стадии;
- статические испытания пролетных строений лишь при напряжениях, при которых появление трещин было исключено;
- статические испытания пролетных строений нагрузкой, имитирующей реальную подвижную временную нагрузку и вызывающей появление и раскрытие трещин до значений, не превышающих нормативных;
- статические испытания пролетных строений вертикальной нагрузкой с выявлением сложных механизмов разрушения.

В процессе испытания пролетного строения производилось последовательное загрузку конструкций в различных сечениях с передвижением нагрузки по длине пролета. Загрузка производилось в несколько этапов с увеличением на каждом этапе значения максимальной нагрузки. Такая методика была принята для того, чтобы, во-первых, имитировать подвижную временную нагрузку и, во-вторых, определить наиболее опасное положение нагрузки для различных сечений.

Была исследована трещиностойкость элементов пролетного строения и отдельной балки как по нормальным, так и по наклонным к продольной оси элементам сечениям. Последовательное загрузку конструкции позволило проследить за образованием и развитием трещин во всех элементах пролетного строения, а также выявить механизмы разрушения пролетного строения.

На рис. 4 приведены результаты испытания пятибалочного бездиафрагменного пролетного строения на нагрузку от собственной массы балок и конструкции проезжей части и временную подвижную нагрузку НК-80 м.

Равномерно-распределенную нагрузку от собственного веса балок и конструкции проезжей части создавали тарированными чугунными гирями массой 20 кг, укладываемыми непосредственно на плиту проезжей части. Распределение прогибов и продольных деформаций во всех балках от этой нагрузки практически одинаковое.

Первый этап испытаний был завершен созданием полной нормативной нагрузки. Ни в одном сечении конструктивных элементов не было обнаружено трещин. Прогиб оси наиболее загруженной балки составил 6,15 мм, или $1/764L$. Деформации бетона и арматуры на контактных поверхностях одинаковы, т.е на данном этапе существовало надежное сцепление между бетоном и напряженной арматурой.

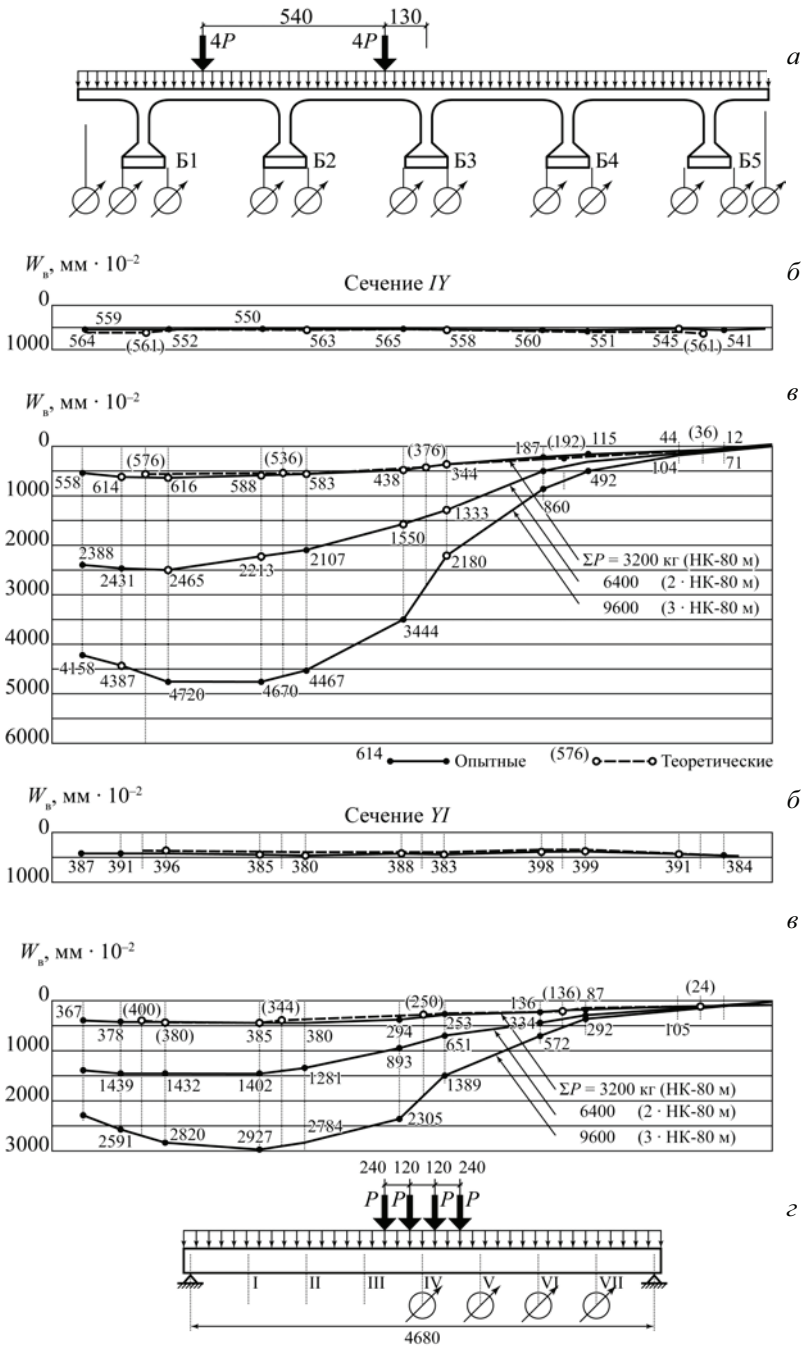


Рис. 4. Вертикальные прогибы балок модели при испытании до разрушения: а, з – схема испытания и расположения приборов; б – характер изменения прогибов по ширине пролетного строения от нагрузки собственного веса балок и конструкции проезжей части; в – то же, от временной нагрузки

При прохождении по пролетному строению нагрузки, соответствующей 1,25 НК-80 м, в нижних зонах двух крайних балок Б1 и Б2 (сечение IV в середине пролета) появились первые трещины. Ширина раскрытия трещин составляла 0,025–0,05 мм.

Теоретические значения были определены по двум методам – между Б.Е. Улицкого и методом конечных элементов.

Момент появления трещин в пролете, найденный из пространственного расчета по методу конечных элементов и расчета сечений, нормальных к продольной оси элемента, по деформационной модели хорошо согласуется с опытным значением.

Первая наклонная к продольной оси балки Б1 трещина появилась при временной нагрузке 1,75 НК-80 м. При дальнейшем повышении нагрузки до 2 НК-80 м косые трещины появились на балках Б2 и Б3.

В этот же момент отмечено появление продольных трещин на плите проезжей части. Появление продольных трещин нарушает связи между элементами пролетного строения, что влечет за собой перераспределение усилий и более сильное загрузку балок, находящихся в непосредственной близости от временной нагрузки. На графике прогибов это явление отмечено вторым переломом линии прогибов балок Б1 и Б2 (см. рис. 4).

При дальнейшем повышении нагрузки начала интенсивно раскрыться продольная трещина, проходящая по грани левого вута балки Б4. Она все больше развивалась по длине по направлению к опорам. Пролетное строение начало разделяться на две части: загруженную с расположенной на ней временной нагрузкой (балки Б1, Б2 и Б3) и незагруженную (балки Б4 и Б5). Прогибы и деформации первых трех балок продолжали интенсивно увеличиваться, а прогибы и деформации балок Б4 и Б5 – уменьшаться, что указывает на образование линейного пластического шарнира в плите проезжей части.

Эпюра прогибов при нагрузке 3 НК-80 м достаточно наглядно показывает работу пролетного строения непосредственно перед разрушением. При нагрузке 3 НК-80 м прогиб балки Б2 достиг 6,7 см и продолжал интенсивно расти. На балке Б2 началось интенсивное раскрытие критической трещины, которая шла под углом приблизительно 30° к горизонтали от точки приложения крайней силы. Ширина раскрытия этой трещины достигла нескольких миллиметров, и началось раздробление сжатой зоны бетона в плите и вертикальной стенке балки Б2.

Таким образом, из проведенных испытаний следует, что работу модели бездиафрагменного пролетного строения можно разделить на три стадии:

- первая стадия – до появления видимых трещин в конструктивных элементах пролетного строения;
- вторая стадия – от появления видимых трещин, нормальных к продольной оси балочных элементов, до появления продольной трещины, разделяющей пролетное строение на две части: загруженную и незагруженную временной нагрузкой;
- третья стадия – от появления критической продольной трещины по плите проезжей части до исчерпания несущей способности пролетного строения.

Проведенные экспериментальные исследования моделей бездиафрагменных пролетных строений позволили:

- выявить действительные условия работы конструкции на всех стадиях загрузки вплоть до разрушения;
- оценить прочность, трещиностойкость и жесткость пролетных строений;
- выявить схемы разрушения, что дает возможность более правильно определить несущую способность бездиафрагменных пролетных строений;
- подтвердить, что для пространственных расчетов пролетных строений требуется изменение расчетной схемы сооружения на различных стадиях работы.

В заключение сделаем следующие выводы:

1. Рациональным способом исследования конструкций, их развития и проектирования является моделирование. Теоретические исследования, выполненные в предположении упругих свойств материалов, целесообразно объединять с экспериментальными исследованиями на моделях. Оба метода исследований – теоретический и экспериментальный – дают возможность правильно представить работу сложных пространственных систем на различных стадиях их работы.

2. При исследовании работы железобетонных пролетных строений более правильно применять для моделей материалы, соответствующие реальным свойствам материала натурной конструкции. Любые характерные особенности материала натурной конструкции должны быть правильно отражены в модели. Необходимо, чтобы зависимости

« $\sigma - \varepsilon$ » при сжатии и растяжении для обоих материалов совпадали или характеристики этих кривых были подобны. В этом случае можно получить подобие всех этапов работы конструкции вплоть до разрушения.

3. В качестве математического аппарата для отыскания критериев подобия и масштабных коэффициентов используется теория подобия с анализом размерностей.

4. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования моделей железобетонных бездиафрагменных пролетных строений позволили выявить работу конструкций на всех стадиях работы вплоть до разрушения и оценить прочность, жесткость и трещиностойкость элементов пролетных строений.

Список литературы

1. Кокодеева Н.Е., Кочетков А.В., Янковский Л.В. Методические подходы реализации принципов технического регулирования в дорожном хозяйстве // Вестник ПГТУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – Пермь, 2011. – №1. – С. 44–56.

2. Янковский Л.В. Моделирование системы основание – геоимплантат – фундамент // Вестник ПГТУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – Пермь, 2011. – №1. – С. 90–98.

3. Янковский Л.В. Описание модели геосреды основания, усиленного геоимплантатной конструкцией // Вестник ПГТУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – Пермь, 2011. – №1. – С. 75–81.

4. Пастушков Г.П., Пастушков В.Г. Оценка влияния роста подвижных нагрузок на изменение напряженно-деформированного состояния балочного пролетного строения моста // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – Минск: Изд-во Бел. гос. техн. ун-та, 2004. – №1. – С. 199–202.

5. Пастушков В.Г. Сборно-монолитная конструкция плиты проезжей части автодорожных мостов: тез. докл. VIII Республ. конф. студентов и аспирантов. – Минск: Изд-во Бел. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 135.

Получено 15.09.2011