

## МОСТЫ И ДОРОГИ

УДК 624.21

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ ГЛАВНЫХ БАЛОК БАЛОЧНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

**В.П. Кожушко, проф., д.т.н.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

*Аннотация.* Рассмотрен вопрос по определению изгибной жесткости главных балок пролетных строений балочных автодорожных мостов, базирующийся на сравнении данных испытаний реальных сооружений и теоретических данных, полученных с применением пространственного метода расчета В.П. Кожушко.

*Ключевые слова:* пространственный расчет пролетных строений, энергетические методы расчета, экспериментальные прогибы главных балок, коэффициенты поперечного распределения.

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗГИНАЛЬНОЇ ЖОРСТКОСТІ ГОЛОВНИХ БАЛОК БАЛКОВИХ ПРОЛЕТНИХ БУДОВ АВТОДОРОЖНИХ МОСТІВ

**В.П. Кожушко, проф., д.т.н.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

*Анотація.* Розглянуто питання щодо визначення згинальної жорсткості головних балок пролётних будов балкових автодорожніх мостів, яке базується на порівнянні даних випробувань реальних споруд і теоретичних даних, отриманих при застосуванні просторового методу розрахунку В.П. Кожушка.

*Ключові слова:* просторовий розрахунок пролётних будов, енергетичні методи розрахунку, експериментальні прогини головних балок, коефіцієнти поперечного розподілу.

## DETERMINATION OF THE BENDING STIFFNESS OF MAIN BEAMS OF ROAD BRIDGE SPANS

**V. Kozhushko, Prof., D. Sc. (Eng.),  
Kharkiv National Automobile and Highway University**

*Abstract.* The problem concerning the determination of flexural stiffness of the main beams of superstructures of highway beam bridges based on the comparison of test data of real structures and theoretical data obtained, using the method of spatial design developed by V. Kozhushko is considered.

*Key words:* spatial design of superstructures, energy design methods, experimental deflections of main beams, transverse distribution coefficients.

**Введение**

Анализ величин прогибов главных балок пролетных строений балочных мостов, полученных экспериментальным путем при ис-

пытании реальных автодорожных мостов, с теоретическими прогибами от тех же испытательных нагрузок показал, что значения теоретически определяемых прогибов значительно больше экспериментальных.

### Анализ публикаций

Это явление отмечается при использовании для определения теоретических прогибов различных пространственных методов расчета пролетных строений [1–20], апробированных при проектировании сооружений и при испытаниях различных пролетных строений различных по величине пролетов, выполненных из различных материалов и имеющих различную конструкцию (монолитных и сборных железобетонных мостов разрезной, неразрезной и балочно-консольной систем, разрезных и неразрезных металлических мостов и мостов со сталежелезобетонными пролетными строениями). При этом увеличенные теоретические прогибы по сравнению с экспериментальными, получают как при использовании точных методов расчета [1–4, 8–13], так и при применении упрощенных методов пространственного расчета пролетных строений [5–7, 14–18]. Однако кривые прогибов (экспериментальные и теоретические, пересчитанные путем введения переводного коэффициента [19]) идентичны, что говорит о правильном описании теоретическими методами расчета процесса распределения временной нагрузки между главными балками пролетных строений.

Таким образом, требуют дальнейших исследований вопрос определения истинной изгибной жесткости главных балок пролетных строений балочных мостов и вопрос о причинах практически неизменной распределительной способности пролетных строений при введении повышенной изгибной жесткости главных балок.

### Цель и постановка задачи

Целью работы является установление истинной изгибной жесткости главных балок балочных мостов и на этой основе – установление реальной конструкции пролетных строений, что особенно важно при испытаниях металлических пролетных строений с железобетонной плитой проезжей части, когда проектная и исполнительная документация на мост утеряна, а при внешнем осмотре часто невозможно определить истинную конструкцию пролетных строений, т.к. внешне металлические и сталежелезобетонные пролетные строения мало отличаются. Установление истинной изгибной жесткости позволит более правильно определять прогибы

главных балок от реально обращающихся по мосту временных нагрузок.

Вторая задача связана с исследованием вопроса изменения распределительной способности пролетных строений при введении различных изгибных жесткостей главных балок, что позволит практически точно определять внутренние усилия в элементах пролетных строений.

### Влияние конструктивных элементов на работу элементов пролетного строения

Отличие экспериментальных и теоретических прогибов однозначно связано с введением в расчет разных по величине изгибных жесткостей  $EJ$  поперечных сечений главных балок пролетных строений.

При определении прогибов теоретическим путем следует вводить повышенные значения изгибных жесткостей по сравнению с рекомендуемыми действующими нормами [20] жесткостями. Эти изгибные жесткости можно получить только при испытаниях пролетных строений реальных мостов. Какие же факторы влияют на увеличение изгибной жесткости главных балок реальных сооружений? На наш взгляд, это: величина модуля упругости бетона, которая зависит от его класса, состава бетонной смеси, вида и марки цемента, технологии приготовления смеси и технологии её укладки, условий твердения бетона и многих других причин. Да и методика определения класса бетона, и особенно модуля его упругости, далека от совершенства. Со временем класс бетона меняется, и правильно определить класс бетона конструктивных элементов сооружения, эксплуатируемого десятки лет, существующими приборами трудно.

Следующим фактором, влияющим на величину изгибной жесткости железобетонного изделия, является точность определения момента инерции его поперечного сечения.

При определении так называемого приведенного момента инерции поперечного сечения железобетонных главных балок пролетного строения учитывается только рабочая арматура. Влияние других видов арматуры (распределительной, конструктивной, противосадочной, арматуры в плите проезжей части, которая часто вводится в состав попе-

речного сечения главных балок, и арматуры других конструктивных элементов пролетного строения) не учитывается. Требуется дальнейших исследований вопрос о ширине плиты проезжей части, которая совместно работает с ребром главной балки. Не учитывается также жесткость плоских или пространственных арматурных каркасов. При определении момента инерции поперечного сечения металлических балок с железобетонной плитой проезжей части сказываются неточности в определении влияния на величину момента инерции железобетонной плиты. Как упоминалось ранее, момент инерции главных балок сталежелезобетонного пролетного строения, часто при отсутствии проектной и исполнительной документации, приходится назначать как для чисто металлического пролетного строения. И только результаты испытания сооружения позволяют сделать вывод о том, что пролетное строение является сталежелезобетонным.

После возведения пролетного строения устраиваются все остальные конструктивные элементы (слои покрытия, тротуары, перила, ограждения проезжей части), влияние которых на величину моментов инерции главных балок теоретически учесть практически невозможно. В металлических и сталежелезобетонных пролетных строениях главные балки объединяются с помощью продольных и поперечных связей, влияние которых на жесткость главных балок и других конструктивных элементов не учитывается.

При испытании пролетных строений на величину прогибов от испытательной нагрузки влияют все вышеперечисленные (а может, и другие, не названные нами) факторы, и пролетное строение прогибается так, как оно «считает нужным». Возникает вопрос, почему при введении в расчет увеличенной жесткости главных балок экспериментальные и теоретические кривые практически совпадают? Во-первых, это говорит, как уже упомянуто ранее, о том, что применяемые пространственные методы расчета пролетных строений правильно описывают его работу при воздействии испытательной нагрузки, а впрочем, и при воздействии всех видов временных нагрузок. Во-вторых, наверное, при введении большой жесткости распределительная способность пролетного строения меняется незначительно. Если это так, то снова возникает вопрос, в каких пределах

должна изменяться изгибная жесткость, чтобы не была значительно нарушена распределительная способность пролетного строения.

Рассмотрим подробнее вопросы работы различных по конструкции пролетных строений под воздействием испытательной нагрузки.

В работе [19] приведен анализ работы пролетного строения при воздействии на него испытательной нагрузки. Мы считаем эти испытания показательными, поскольку нагружалось бездиафрагменное железобетонное пролетное строение после снятия слоев покрытия, а также демонтажа тротуаров, перил и ограждений, т.е. было испытано пролетное строение, состоящее только из главных балок, объединенных между собой. В поперечном сечении было установлено 6 главных балок с расстояниями между ними, равными 166 см. В работе [19] показано, что изменение показателя гибкости  $\alpha$  системы от 0,1 до 0,2 (т.е. в 2 раза) привело к незначительному изменению коэффициентов поперечного распределения. Таким образом, распределительная способность этих пролетных строений при изменении жесткости главных балок практически осталась неизменной. Вот почему при введении повышенной изгибной жесткости главных балок форма линии теоретически полученных прогибов практически не изменилась и немногим отличается от экспериментально полученной кривой [19]. Расчет пролетных строений был произведен методом, разработанным автором [14–17].

Проверим эти выводы путем анализа экспериментальных и теоретических прогибов испытанных пролетных строений иных конструкций.

Работа [21] посвящена исследованию распределительной способности балочного разрезного пролетного строения пролетом  $l = 16,76$  м, построенного из железобетонных балок с диафрагмами, выполненными по типовому проекту № 122-63, разработанному Союздорпроектом. В поперечном направлении было установлено 8 главных балок на расстояниях от 160 до 169 см. Испытания проведены путем загрузки пролетных строений 6 автомобилями «Татра». Теоретические расчеты были проведены по предлагаемому нами пространственному методу расчета при  $\alpha = 0,0073, 0,010$  и  $0,025$ , т.е. при показателях гибкости  $\alpha$ , отличающихся в

2,50 и 3,42 раза. Анализ величин теоретических коэффициентов поперечного распределения, приведенных в этой работе, показал, что они отличаются в 1,043–1,140 раза при изменении показателя  $\alpha$  в 3,42 раза и всего в 1,040–1,067 раза при изменении показателя гибкости в 2,5 раза. Теоретические коэффициенты поперечного распределения близки к экспериментальным, что подтверждает тезис о возможности введения при определении прогибов повышенной изгибной жесткости и для данных (диафрагменных разрезных) пролетных строений автодорожных мостов.

Рассмотрим результаты испытания пролетного строения моста через р. Кальмиус с. Раздольное на автомобильной дороге Донецк–Новоазовск, проведенного в 1969 году мостоиспытательной станцией кафедры мостов ХАДИ с участием автора статьи. Пролетное строение смонтировано из 12 главных балок, установленных поперек моста на расстояниях от 830 до 895 мм, т.е. со средним расстоянием между балками, равным 860 мм (в типовом проекте предусмотрено это расстояние равным 850 мм). Главные балки – струнотонные, диафрагменные, выполненные по типовому проекту ВТП-16, разработанному УкрдортрансНИИ. В качестве испытательной нагрузки были использованы 2 незагруженных автомобиля марки БелАЗ-540 (рис.1), которые устанавливались по схеме «а» (несимметричное нагружение) и «б» (приблизительное симметричное нагружение). Испытательной нагрузкой нагружался пролет №4 длиной 16,43 м (расчетный пролет главных балок этого пролетного строения равен 16,30 м). Схемы нагружения приведены на рис. 2. Общий вес одного автомобиля равен 210 кН. Через заднюю ось передается усилие 122 кН, через переднюю – 88 кН. Для измерения прогибов были применены прогибомеры Максимова.

Теоретические прогибы были определены методом автора.

Были построены линии влияния усилий, передаваемых диафрагмами на главные балки пролетного строения, при показателе гибкости системы  $\alpha = 0,001246$  (рис. 3), рассчитанном при моменте инерции главных балок  $J_{red} = 2,397 \cdot 10^{-2} \text{ м}^4$  и полученном при учете только рабочей арматуры, и при  $\alpha = 0,001783$ , т.е. при моменте инерции  $J_{red}$ , увеличенном в 1,407 раза.

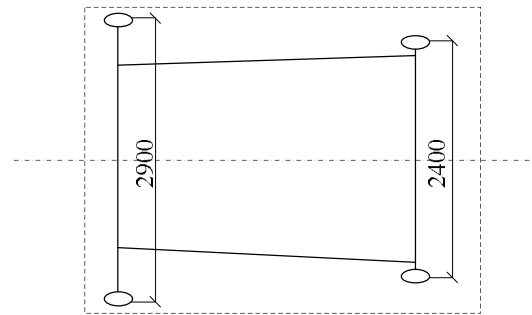
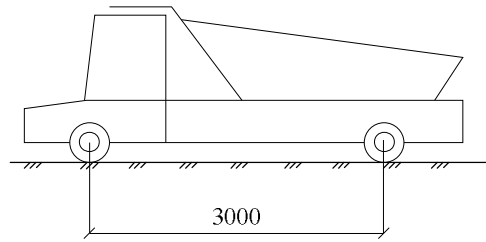


Рис. 1. Схема автомобиля БелАЗ-540

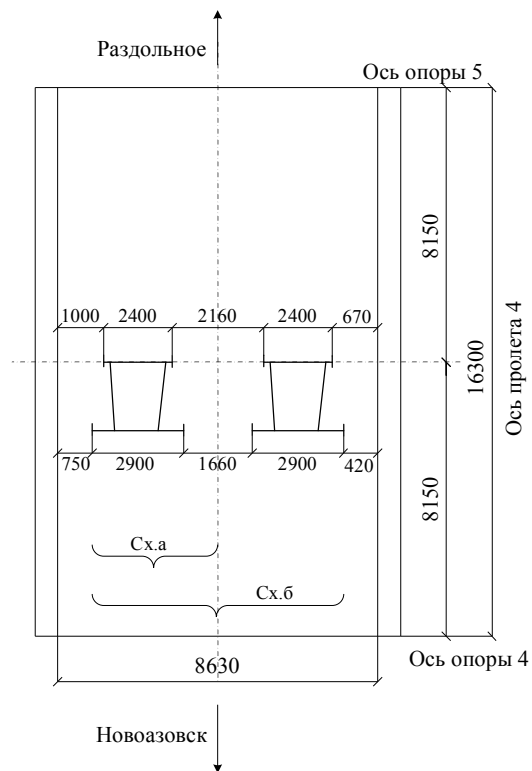


Рис. 2. Схема установки испытательной нагрузки

После загрузки линий влияния усилий испытательной нагрузкой были определены коэффициенты поперечного распределения и теоретические прогибы главных балок в середине пролета. Линии экспериментальных и теоретических прогибов приведены на рис.4, а коэффициенты поперечного распределения сведены в табл. 1.

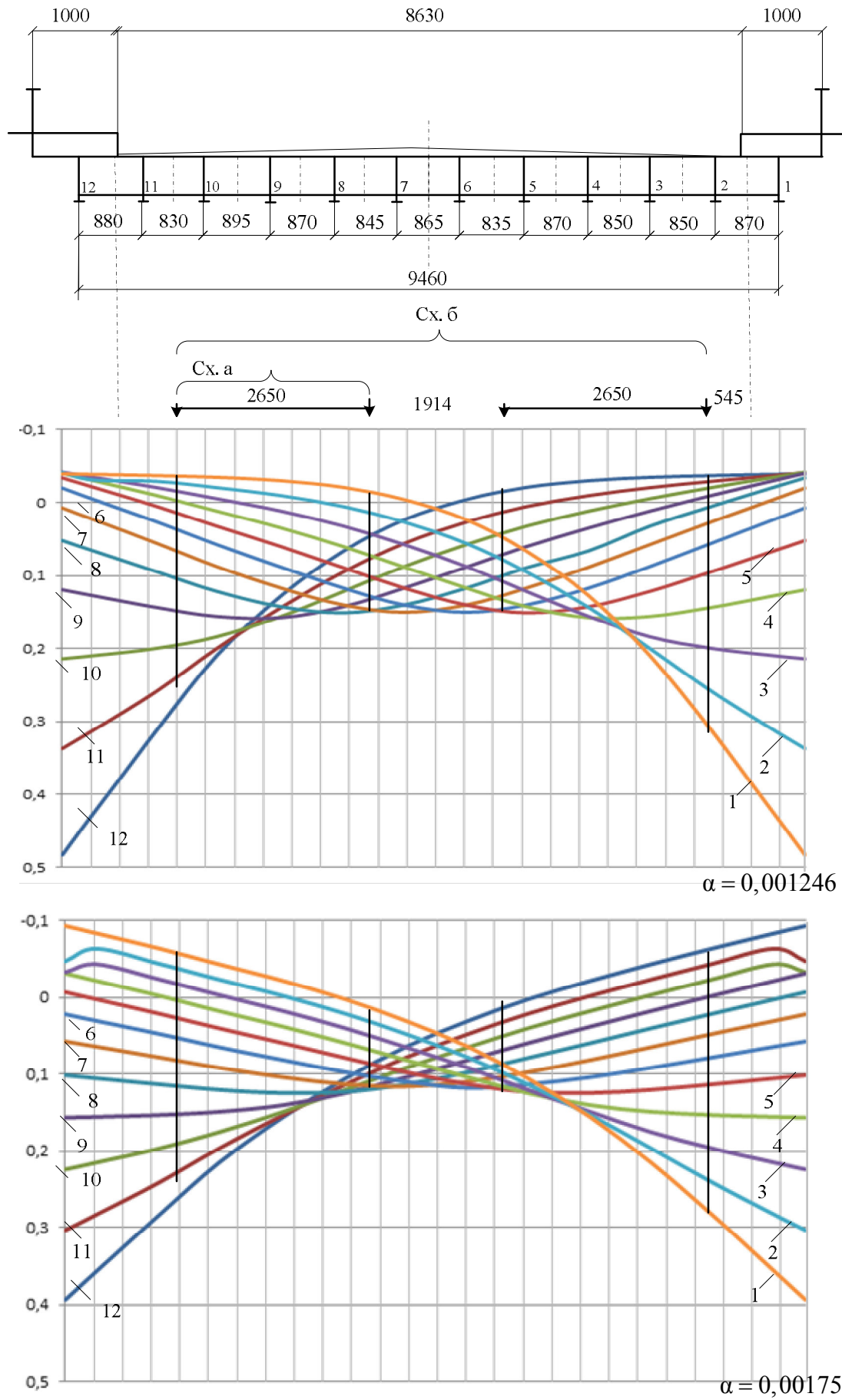


Рис. 3. Линии влияния усилий и схемы их загрузки испытательной нагрузкой

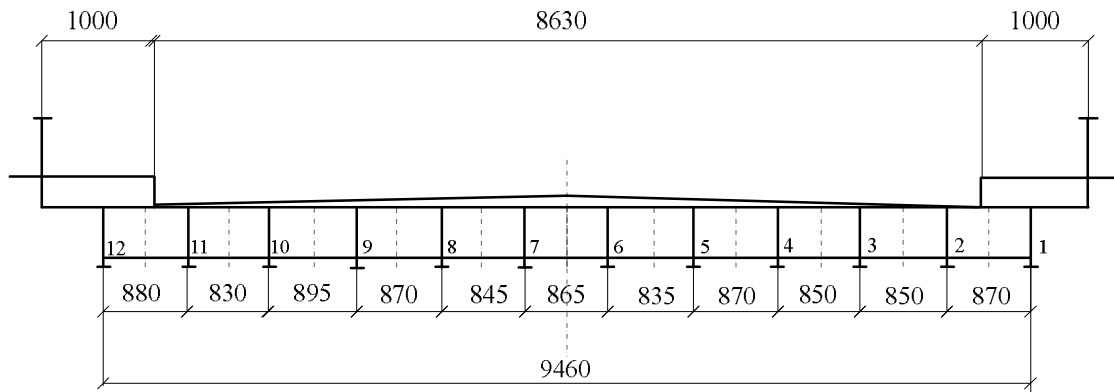


Схема «а»

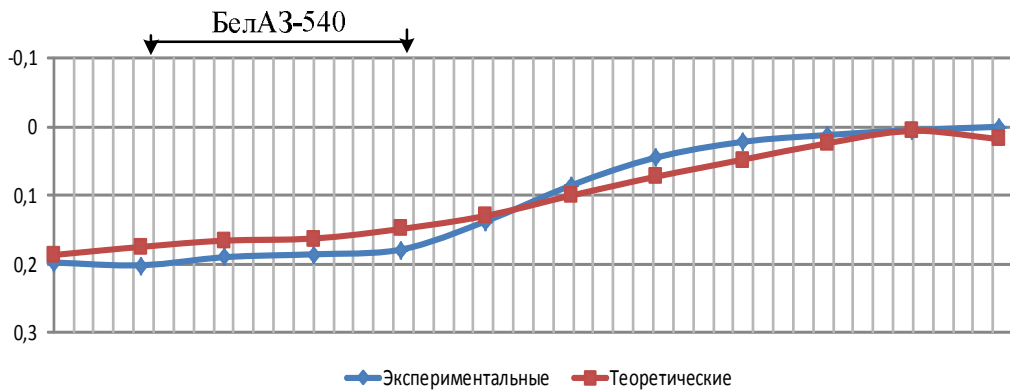


Схема «б»

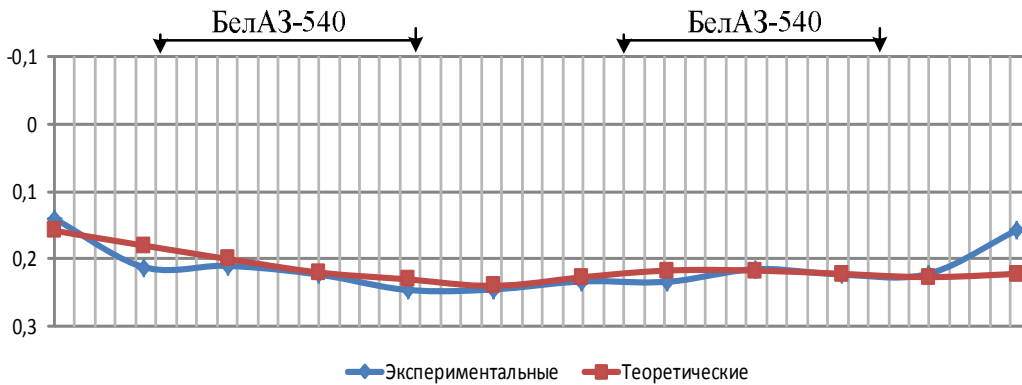


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические кривые прогибов при  $\alpha = 0,001753$

Таблица 1 Экспериментальные и теоретические коэффициенты поперечного распределения для схемы нагружения «б»

Данные	Балки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Экспериментальные	0,061	0,087	0,087	0,084	0,091	0,091	0,096	0,096	0,087	0,082	0,083	0,055
Теоретические $\alpha = 0,001246$	0,073	0,078	0,093	0,093	0,103	0,098	0,093	0,090	0,088	0,073	0,062	0,058
Теоретические $\alpha = 0,001753$	0,087	0,089	0,087	0,085	0,085	0,088	0,094	0,096	0,086	0,078	0,070	0,062

Из рис. 4 видно, что ординаты экспериментальных и теоретических кривых близки, а кривые – идентичны.

Анализ значений коэффициентов поперечного распределения (табл. 1) показывает, что при изменении жесткости главных балок пролетного строения в 1,407 раза распределительная способность пролетных строений изменяется незначительно.

Таким образом, и для этих пролетных строений при определении прогибов можно вводить повышенную изгибную жесткость главных балок.

Все предыдущие пролетные строения, рассмотренные в данной статье, – железобетонные. Проанализируем работу металлических и сталежелезобетонных пролетных строений.

В работе [19] приведены результаты испытаний неразрезного сталежелезобетонного пролетного строения, в котором принимал участие автор статьи. При испытаниях были использованы загруженные автомобили «Татра». Испытанию были подвержены пролеты длиной 37,6 и 16,0 м. В поперечном направлении было установлено 8 металлических главных балок. Расстояние между средними главными балками равно 3 м, а между остальными балками – 2 м. Мост – широкий. Габарит проезда составляет 14 м, а ширина тротуаров – по 3 м. Для анализа работы пролетных строений были использованы 3 метода: метод рычага, метод внецентренного сжатия и энергетический метод Л.В. Семенца [10].

Наилучшее совпадение экспериментальных и теоретических прогибов дал метод Л.В. Семенца, на основе которого и были сделаны следующие выводы:

- а) пролетные строения работают как сталежелезобетонные;
- б) введение в расчет фактической увеличенной жесткости, определяемой по данным испытаний, практически не изменяет распределительную способность пролетных строений.

В 2008 году сотрудниками кафедры мостов, конструкций и строительной механики с участием автора были проведены испытания металлического пролетного строения моста через р. Сумку в г. Сумы [19].

В поперечном направлении пролетного строения установлены 4 многорешетчатые фермы на расстояниях 3,25 и 3,27 м. Ширина проезда моста равна 10,55 м, ширина тротуаров – по 1,5 м, длина ферм – 23,4 м. При испытаниях были задействованы 6 автомобилей КраЗ. Экспериментальные кривые прогибов и кривые прогибов, рассчитанных по методу автора, – идентичны.

Проведенные исследования показали, что при введении в расчет увеличенной изгибной жесткости ферм в 2,7 раза, по сравнению с первоначально вводимой жесткостью ферм, практически не привело к изменению распределительной способности пролетных строений. Таким образом, введение даже такой значительно увеличенной изгибной жесткости главных несущих элементов пролетного строения правомочно при определении прогибов в металлических мостах от временных нагрузок.

Второй вывод, который следует сделать после анализа экспериментальных и теоретических прогибов, свидетельствует о том, что пролетное строение работает как сталежелезобетонное.

### Выводы

Данные испытаний реальных сооружений позволяют определять истинную изгибную жесткость главных несущих элементов балочных мостов, выполненных как в железобетоне, так и в металле.

Введение повышенной (в некоторых случаях в 2–3 раза) изгибной жесткости главных балок (ферм) практически не влияет на распределительную способность балочных пролетных строений.

### Литература

1. Улицкий Б.Е. Вопросы пространственного расчета балочных мостов / Б.Е. Улицкий. – М.: Автотрансиздат, 1956. – 60 с.
2. Улицкий Б.Е. Пространственные расчеты балочных мостов / Б.Е. Улицкий. – М.: Автотрансиздат, 1962. – 180 с.
3. Улицкий Б.Е. Пространственный расчет бездиафрагменных пролетных строений / Б.Е. Улицкий. – М.: Автотрансиздат, 1963. – 204 с.

4. Улицкий Б.Е. Автоматизация проектирования плитно-балочных разрезных мостов / Б.Е. Улицкий, Ю.М. Егорушкин, В.А. Ермолов; под общ. ред. Б.Е. Улицкого // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та трансп. стр-ва (ЦНИИС). – 1976. – Вып. 102.
5. Трифонов И.А. Практический метод расчета железобетонных большепролетных балочных мостов переменной жесткости / И.А. Трифонов // Сб. тр. МИСИ. – 1957. – Вып. 17 – С. 69–85.
6. Железобетонные конструкции [Спецкурс: учебное пособие для вузов] / В.Н. Байков, П.Ф. Дроздов, И.А. Трофимов и др.; под общ. ред. В.Н. Байкова. – 3-е изд., перераб. – М.: Стройиздат, 1981. – 768 с.
7. Российский В.А. Практическое применение метода упругих опор к расчету пролетных строений балочных мостов / В.А. Российский // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1959. – №8. – С. 38–50.
8. Российский В.А. Пространственный расчет пролетных строений балочных автодорожных мостов / В.А. Российский, Л.В. Семенец. – Х.: ХАДИ, 1962. – 100 с.
9. Російський В.О. Дослідження роботи прольотних будов сталезалізобетонних мостів при неоднакових перерізах головних балок і неоднакових відстанях між ними / В.О. Російський, Л.В. Семенец, В.П. Кожушко // Автом. дороги і дор. буд-во. – 1974. – Вип. XV. – С. 158–162.
10. Семенец Л.В. Пространственный расчет балочных мостов с учетом кручения / Л.В. Семенец // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1959. – №5. – С. 55–63.
11. Семенец Л.В. Пространственный расчет консольно-балочных мостов / Л.В. Семенец // Расчет пространственных строительных конструкций. Задачи стр-й механики упругих и упруго-пластических систем. – 1973. – Вып. 3. – С. 143–152.
12. Гибшман М.Е. Проектирование транспортных сооружений: учебник для вузов / М.Е. Гибшман, В.И. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1988. – 148 с.
13. Лукин Н.П. Пространственный расчет бездиафрагменных мостов энергетическим способом / Н.П. Лукин // Сопро- тивление материалов и теория сооружений. – 1968. – Вып. VI. – С. 112–123.
14. Кожушко В.П. Расчет пролетных строений балочных мостов разрезной системы / В.П. Кожушко // Сопроотивление материалов и теория сооружений. – 1980. – Вып. 36. – С. 118–122.
15. Кожушко В.П. Расчет неразрезных балочных мостов регулярной и нерегулярной систем на временную нагрузку/ В.П. Кожушко // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1982. – №5. – С. 118–121.
16. Кожушко В.П. До розрахунку балочно-консольних прогінних будов на тимчасове навантаження / В.П. Кожушко // Автом. дороги і дор. буд-во. – 1985. – Вип. 37. – С. 56–60.
17. Кожушко В.П. Моделювання прольотних будов мостів: монографія / В.П. Кожушко. – Х.: ХНАДУ, 2010. – 196 с.
18. Повышение долговечности автодорожных мостов: монография / В.П. Кожушко, А.В. Бильченко, А.Г. Кислов и др.; под ред. В.П. Кожушко. – Х.: ХНАДУ, 2016. – 236 с.
19. Кожушко В.П. Влияние изгибной жесткости элементов пролетного строения на его распределительную способность / В.П. Кожушко // Науковий вісник будівництва. – 2013. – Вип. 73. – С. 189–195.
20. Споруди транспорту. Мости і труби. Правила проектування: ДБН В.2.3 – 14:2006. – (Чинні від 2007-02-01). – К.: Міністерство буд-ва, архітектури та житлово-комунального господарства, 2006. – 360 с. – (Державні будівельні норми України).
21. Кожушко В.П. Некоторые вопросы распределительной способности пролетных строений балочных разрезных мостов / В.П. Кожушко // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1991. – № 8. – С. 99–102.
22. Кожушко В.П. Распределительная способность металлического пролетного строения из многорешетчатых ферм / В.П. Кожушко // Науковий вісник будівництва. – 2010. – Вип. 61. – С. 120–129.

Рецензент: В.К. Жданюк, профессор, д.т.н., ХНАДУ.