

## ИСПЫТАНИЯ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕДЛЕННО ДВИЖУЩЕЙСЯ НАГРУЗКОЙ

**Сухоруков Б.Д.**

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна*

---

В последние годы на вооружении мостоиспытательных станций и научно-исследовательских лабораторий появилось новое поколение датчиков, регистрирующей аппаратуры и компьютерных программ для записи, хранения, обработки и визуализации результатов измерения величин фибровых деформаций, перемещений, ускорений и т.п. в испытываемых конструкциях.

Объединение в одну сеть компьютера и приборов для измерения физических параметров открыло широкие возможности как для повышения точности и увеличения объёма снимаемой информации, так и для решения трудоёмких вычислительных задач, связанных с обработкой больших её массивов.

Новые возможности дают основания для пересмотра традиционных подходов к организации и проведению натурных испытаний. В этом плане испытания мостовых конструкций медленно движущейся «проползающей» с постоянной скоростью нагрузкой представляют особый интерес и являются весьма перспективным направлением.

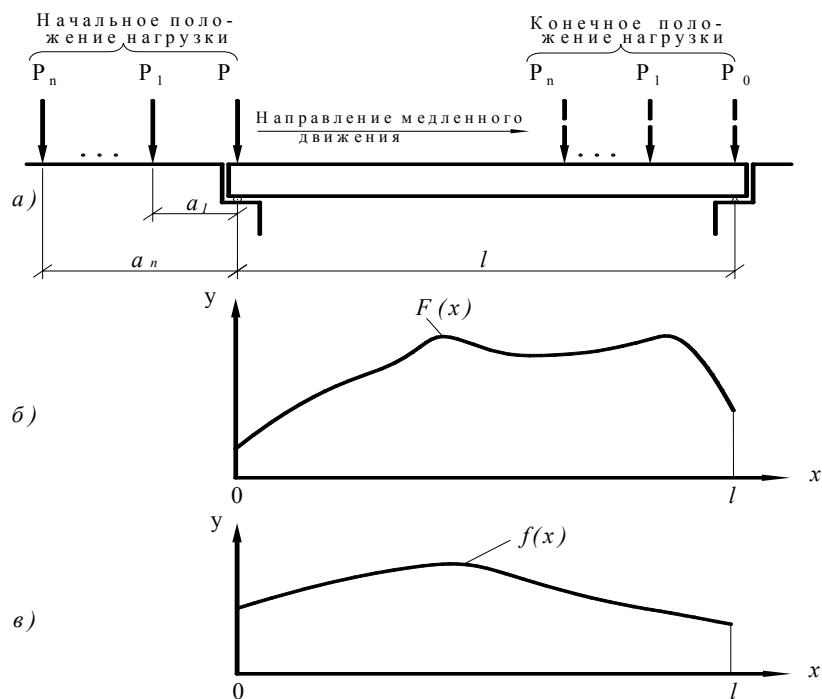
Так, при малой скорости движения нагрузки (до 5 км/ч) усилия в элементах испытываемой конструкции меняются плавно, не вызывая колебаний последней. При этом с датчиков в память компьютера будут записываться «статические» значения измеряемых величин связанных с конкретным, но меняющимся положением нагрузки на пролётном строении моста. Очевидно, что время, необходимое на проведение таких испытаний, намного меньше, чем при последовательной перестановке испытательной нагрузки на проезжей части моста сначала в одно положение и снятие показаний приборов, затем в следующее и так далее (а для построения натуральных линий влияния без таких перестановок нагрузки раньше вообще нельзя было обойтись). Да и частота, скорость и объём снимаемых с датчиков показаний при «проползающей» нагрузке не сопоставимо большие, чем при традиционных статических испытаниях.

Всё это в сочетании с возможностями использования встроенных математических библиотек в компьютерных программах для записи, хранения и анализа данных измерений позволит оперативно, прямо на объекте получать в удобной форме (числовой или графической) конечные результаты испытаний и, в случае необходимости, по ходу вносить в их программу изменения. Например, задав соответствующий алгоритм вычислений и вводя весовые и геометрические параметры испытательной нагрузки, можно будет строить натурные линии влияния и сравнивать их с теоретическими. А это – более высокий уровень сравнения, чем сравнение по отдельным значениям фактических и расчётных величин прогибов или напряжений при заданном положении нагрузки.

Таким образом, отработка и широкое внедрение в мостоиспытательную практику методики натурных испытаний медленно движущейся нагрузкой является актуальной технической задачей. Одним из необходимых шагов на пути её решения должен быть выбор и задание рационального алгоритма вычислений ординат искомых натуральных линий влияния, зависящего как от типа испытательной нагрузки (колёсная или гусеничная), так и от направления её движения (вдоль или поперёк проезжей части моста).

Воздействие колёсной нагрузки на испытываемую конструкцию осуществляется в виде сосредоточенных вертикальных сил веса (давлений на оси). Для железнодорожных мостов – это давление осей локомотива на рельсы, а для автодорожных мостов – это сосредоточенное давление на проезжую часть колёс грузовика, трейлера или другого тяжелого транспортного средства. В отличие от колёсной воздействие гусеничной нагрузки (танк, трактор и т.п.) на конструкцию осуществляется не в виде сосредоточенных сил  $P_i$ , а в виде равномерно распределённой по длине гусеницы нагрузки  $q$ .

Вначале рассмотрим случай загрузки мостовой конструкции, медленно движущейся в продольном направлении колёсной нагрузкой, как показано на рис. 1.



- а) – схема испытательной нагрузки (локомотив, грузовик), заданной сосредоточенными силами  $P_0, P_1, \dots, P_n$  и её исходное и конечное положение в процессе загрузки;  
 б) – график функции загрузки  $F(x)$  (осциллограмма);  
 в) – искомая линия влияния  $f(x)$

Рис. 1. Схема загрузки пролётного строения испытательной нагрузкой с целью построения продольных натуральных линий влияния

Пусть мы имеем колёсную испытательную нагрузку в виде  $n + 1$  сосредоточенных сил (осей)  $P_0, P_1, \dots, P_n$  с заданными расстояниями от передней оси  $a_1, a_2, \dots, a_n$  (рис. 1,а), а также запись (осциллограмму) перемещения, усилия или напряжения для какой либо точки конструкции во всех возможных положениях нагрузки на длине пролёта  $l$  (рис. 1,б). Такую запись можно рассматривать как известную функцию  $F(x)$  статического нагружения нагрузкой искомой линии влияния  $f(x)$ , ординаты которой надлежит вычислить (рис.1,в). Здесь в качестве аргумента  $x$  обеих функций удобно принять текущую координату передней оси нагрузки относительно начала линии влияния.

Если бы испытательная нагрузка состояла только из одной осей  $P_0$ , то задача вычисления ординат натурной линии влияния  $f(x)$  по известной функции (осциллограмме)  $F(x)$  решалась бы совсем просто:

$$f(x) = \frac{F(x)}{P_0}. \quad (1)$$

Однако реальная испытательная нагрузка имеет не одну, а две и более осей. И всё же выражение (1), справедливое для одной оси, может быть положено в основу алгоритма вычисления ординат натуральных линий влияния по осциллограммам, записанным под многоосной испытательной нагрузкой.

Действительно, в случае нагрузки из двух и более осей выражение (1) будет справедливо лишь на первом отрезке линии влияния длиной  $a_1$  (пока над линией влияния располагается лишь одна первая ось нагрузки). То есть на отрезке  $[0, a_1)$  искомая функция  $f(x)$  становится уже известной.

При появлении над линией влияния второй оси нагрузки и до появления третьей оси, а это – отрезок  $[a_1, a_2)$ , функция  $F(x)$  представляет собой результат суммарного действия двух сил (осей нагрузки). При этом вторая ось нагрузки располагается на отрезке  $[0, a_1)$ , где значения функции  $f(x)$  ранее найдены. Последнее обстоятельство даёт возможность вычислить ординаты искомой линии на отрезке  $[a_1, a_2)$  по формуле:

$$f(x) = \frac{1}{P_0} [F(x) - P_1 f(x - a_1)]. \quad (2)$$

Аналогичные рассуждения для третьей и последующих осей позволяют записать решение в общем виде, справедливое на всём отрезке  $[0, l]$  области определения искомой функции  $f(x)$ :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{P_0} [F(x) - (P_1 f(x - a_1) + \dots + P_n f(x - a_n))], & 0 \leq x \leq l; \\ 0, & x < 0 \vee x > l. \end{cases} \quad (3)$$

Перейдём теперь к рассмотрению случая загрузки мостовой конструкции медленно движущейся гусеничной нагрузкой. Пусть схема такой нагрузки задана длиной её гусениц  $b$  и интенсивностью равномерно распределённого давления  $q$ . Как и для предыдущего случая колёсной нагрузки в качестве аргумента  $x$  функции загрузки  $F(x)$  и отыскиваемой по ней линии влияния  $f(x)$ , принимаем текущую координату переднего края гусеницы относительно начала загружаемого пролёта.

Аналитически функцию загрузки  $F(x)$  для случая гусеничной нагрузки можно представить в виде

$$F(x) = \begin{cases} q \int_0^x f(x) dx - q \int_0^{x-b} f(x) dx, & 0 \leq x \leq l; \\ 0, & x < 0 \vee x > l. \end{cases} \quad (4)$$

Продифференцировав левую и правую части выражения (4) по  $x$  после несложных преобразований окончательно получаем

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{q} \frac{dF(x)}{dx} + f(x-b), & 0 \leq x \leq l; \\ 0, & x < 0 \vee x > l. \end{cases} \quad (5)$$

Следует подчеркнуть, что при строго последовательном ходе вычислений значений ординат искомой функции  $f(x)$  для каждого очередного значения аргумента  $x$  численные значения функций  $f(x-a_i)$   $i=1, 2, \dots, n$  в решении (3) и функции  $f(x-b)$  в решении (5) оказываются ранее подсчитанными (уже известными).

До сих пор речь шла о построении натуральных линий влияния для мостовых конструкций по осциллограммам процесса их загрузки движущейся в продольном направлении испытательной нагрузкой и при этом сам процесс начинался с последовательного наезда на конструкцию сначала первой оси нагрузки, затем второй и т.д. Для случаев, когда нет возможности начать процесс загрузки именно в таком порядке, следует искать другой подход.

Рассмотрим следующую задачу. Пусть мы хотим вычислить ординаты натурной поперечной линии влияния  $f(x)$  для пролётного строения автодорожного моста по полученной при его испытании функции-осциллограмме  $F(x)$  для случая медленного перемещения двухосного грузовика поперёк оси моста. При этом на проезжей части пролётного строения никак не может находиться только одна ось грузовика, а обязательно две (рис. 2). Только по одной известной функции загрузки  $F_1(x)$  (движение грузовика кабиной вперёд) однозначно определить искомую функцию  $f(x)$  невозможно. Задача может быть решена при соблюдении двух дополнительных условий:

- 1) у грузовика давления на переднюю и заднюю оси различные, то есть  $P_1 \neq P_2$ ;
- 2) кроме функции-осциллограммы загрузки  $F_1(x)$  при движении грузовика слева направо кабиной вперёд (рис. 2,а) должна быть известна функция-осциллограмма загрузки  $F_2(x)$  при движении грузовика слева направо кузовом вперёд (рис. 2,б).

Если оба эти условия соблюдены, то система уравнений

$$\begin{cases} F_1(x) = P_1 f(x+a) + P_2 f(x); \\ F_2(x) = P_2 f(x+a) + P_1 f(x), \end{cases} \quad (6)$$

в которой неизвестными являются искомая функция  $f(x)$  и  $f(x+a)$ , будет иметь следующее решение для  $f(x)$ :

$$f(x) = \frac{P_2 F_1(x) - P_1 F_2(x)}{P_2^2 - P_1^2}, \quad (7)$$

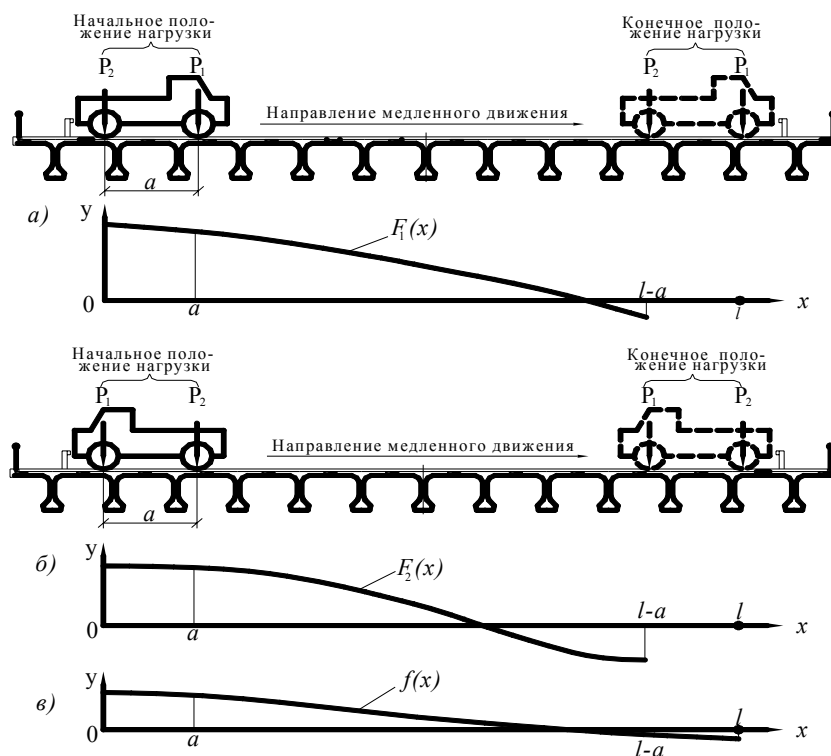
Заметим, что выражение (7) определяет функцию  $f(x)$  на отрезке  $[0, l-a]$  (рис. 2,в). Несложно показать, что на отрезке  $[a, l]$  функция  $f(x)$  определяется выражением:

$$f(x) = \frac{P_2 F_2(x-a) - P_1 F_1(x-a)}{P_2^2 - P_1^2}. \quad (8)$$

Таким образом, ординаты искомой поперечной линии влияния могут быть вычислены, и линия построена для всей той части ширины пролётного строения  $l$  (при  $l \geq 2a$ ), над которой находились колёса грузовика во время испытаний.

Поскольку на отрезке  $[a, l-a]$  функция  $f(x)$  определяется одновременно и выражением (7), и выражением (8), то на этом отрезке справедливо равенство

$$\frac{P_2 F_1(x) - P_1 F_2(x)}{P_2^2 - P_1^2} = \frac{P_2 F_2(x-a) - P_1 F_1(x-a)}{P_2^2 - P_1^2}, \quad (9)$$



- а) – исходное и конечное положения нагрузки при её движении кабиной вперёд и соответствующий такому движению график функции загрузки  $F_1(x)$  (осциллограмма);  
 б) – исходное и конечное положения нагрузки при её движении задним ходом и соответствующий такому движению график функции загрузки  $F_2(x)$ ;  
 в) – искомая линия влияния  $f(x)$

Рис. 2. Схема загрузки автодорожного пролётного строения испытательной нагрузкой с целью построения поперечных линий влияния

преобразовав которое окончательно получаем:

$$\frac{F_1(x) - F_2(x - a)}{F_2(x) - F_1(x - a)} = \frac{P_1}{P_2}, \quad a \leq x \leq l - a. \quad (10)$$

Равенство (10) можно использовать, как критерий точности записанных во время испытаний в память компьютера исходных функций-осциллограмм загрузок  $F_1(x)$  и  $F_2(x)$  и вычисленных по ним ординат искомой линии влияния – функции  $f(x)$ .

Правильность полученного решения (3) для колёсной многоосной нагрузки и решения (5) – для гусеничной нагрузки (при вычислении ординат продольных натуральных линий влияния), а также правильность решений (7) и (8) для нахождения ординат поперечных линий влияния были подтверждены численными экспериментами [1].

Отметим, что во всех вышеприведенных решениях  $P_i$  – это давление веса колёсной испытательной нагрузки, создаваемое её  $i$ -той осью (суммарное на два колеса), а для случая гусеничной нагрузки  $q$  – погонное давление веса также суммарное на две гусеницы. Определяемые ординаты натуральных линий влияния будут «осреднёнными» в том смысле, что формально относиться они будут к тому продольному или поперечному сечению пролётного

строения, которое совпадало с продольной осью испытательной нагрузки, а фактически являются суммарным результатом загрузки двух на пока не известных линиях влияния для сечений, совпадающих одно с левой, а другое с правой колеей испытательной нагрузки. Во многих практических случаях такое «осреднение» является приемлемым и дальнейших уточнений не требует.

Если же необходимо определить точные значения ординат натурной линии влияния для конкретного поперечного сечения пролётного строения, то этого можно добиться, применив следующий приём. От выбранного сечения в сторону ближнего конца пролётного строения на проезжей части с шагом равным ширине колеи испытательной нагрузки наносится поперечная разметка (направляющие линии для колёс испытательной нагрузки).

Пропуская испытательную нагрузку сначала так, что бы лишь одна её колея находилась на пролёте, а вторая – вне его: на опоре или соседнем пролёте, мы получаем возможность найти точные значения натурной поперечной линии влияния именно для сечения пролётного строения, где была нанесена ближняя к опоре линия разметки.

Затем нагрузку пропускают со сдвижкой вдоль пролёта на один шаг. Поскольку при этом одна колея нагрузки совпадает с сечением, где уже известны ординаты натурной линии влияния, а вторая – с сечением, где они пока неизвестны, то последние могут быть найдены как разность удвоенных значений соответствующих ординат «осреднённой» линии влияния и уже известной. То есть и для второго сечения точные значения ординат натурной линии влияния становятся известными.

Поступая последовательно аналогичным образом, можно определить ординаты и построить поперечные натурные линии влияния для всех размеченных сечений пролётного строения. Этим же способом можно получить данные для построения натурной поверхности влияния на всей площади проезжей части испытываемого пролётного строения.

Раньше, когда записи процессов загрузки велись исключительно на ленту осциллографа или самописца, а расшифровка (оцифровка) таких записей проводилась «вручную», предлагаемые алгоритмы вычисления ординат натуральных линий влияния были бы неприемлемы из-за большого влияния на конечный результат неизбежных погрешностей измерения ординат исходных осциллограмм. Тогда для минимизации погрешностей применялись более сложные алгоритмы с использованием разложения функции  $F(x)$  в ряд Фурье [2].

Для современной регистрирующей аппаратуры, когда исходные ординаты функций загрузки  $F(x)$  заносятся в память компьютера в оцифрованном виде с высокой точностью при малом шаге квантования  $\Delta x$ , предложенные нами относительно простые алгоритмы вычисления ординат натуральных линий влияния обеспечивают нужную точность.

## **Выводы**

Давно известный, но мало используемый в мостоиспытательной практике приём загрузки мостовых конструкций медленно движущейся нагрузкой при наличии современной измерительной аппаратуры, объединённой в одну сеть с компьютером, имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными статическими испытаниями, ставящими целью построение натуральных линий влияния. При этом сокращается время, необходимое на проведение испытаний, и увеличивается объём полезной информации.

Предложенные алгоритмы вычисления ординат натуральных линий влияния по осциллограммам загрузки мостовых конструкций медленно движущейся испытательной нагрузкой позволяют реализовать потенциальную возможность оперативного (в полевых условиях) получения и анализа конечных результатов испытаний и, в частности, строить не только линии, но и натурные поверхности влияния напряжений, перемещений и т.п., для всех тех точек конструкции, где были установлены соответствующие датчики.

Совершенствование методики проведения натурных испытаний медленно движущейся нагрузкой и создание банка данных получаемых при этом результатов будут способствовать повышению объективности в оценках фактического состояния и грузоподъемности находящихся в эксплуатации мостов.

### **Литература**

1. Сухоруков Б.Д. Построение линий влияния по осциллограммам загрузки мостовых конструкций медленно движущейся испытательной нагрузкой // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. № 47. – Дн-вск., ПГАСА, 2008.– С.640-648.
2. Денищенко Ю.Н., Тарасенко В.П., Петренко С.А. Построение линий влияния усилий в элементах мостовых и строительных конструкций по экспериментальным данным.– В кн.: Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. научн. тр., вып. 214/25. – Днепропетровск: ДИИТ, 1982. – С. 28-33.