

УДК 624.21

### ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИЙ ВЛИЯНИЯ ПО ОСЦИЛЛОГРАММАМ ЗАГРУЖЕНИЯ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕДЛЕННО ДВИЖУЩЕЙСЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

Б. Д. Сухоруков, с.н.с.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. г. Днепропетровск

При расчётах мостовых конструкций на подвижные нагрузки широко используются линии влияния – графики зависимостей усилий, напряжений или перемещений в элементах или точках конструкции от положения единичной силы на проезжей части моста.

Из-за наличия дефектов в несущих конструкциях или же не учтённых при проектировании сооружений факторов, теоретические линии влияния, по которым проводился расчёт, могут не совпадать с истинными (натурными), присущими конкретному, находящемуся в эксплуатации, мосту. Очевидно, что чем больше будут эти отличия, тем заметнее может разниться фактическая грузоподъёмность сооружения от проектной. Вот почему при оценке фактической грузоподъёмности моста очень важно иметь натурные линии влияния, которые могут быть получены лишь при испытаниях сооружения.

Построение натуральных линий влияния по данным статических испытаний требует значительного числа различных установок испытательной нагрузки на проезжей части моста. Затраты времени на проведение таких испытаний весьма велики, что для находящегося в эксплуатации сооружения не всегда приемлемо.

Существенно сократить время проведения испытаний, необходимых для построения натуральных линий влияния, позволяет использование аппаратуры для регистрации динамических процессов. Запись напряжений или перемещений для конкретных точек конструкции, в увязке с положением на мосту движущейся испытательной нагрузки при её малой постоянной скорости (до 5 км/час), фактически не будет содержать динамической составляющей процесса.

На практике испытательная нагрузка может быть колёсной и гусеничной. 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  $q$ .

В начале рассмотрим случай загрузки мостовой конструкции, медленно движущейся колёсной нагрузкой, как показано на рис. 1.

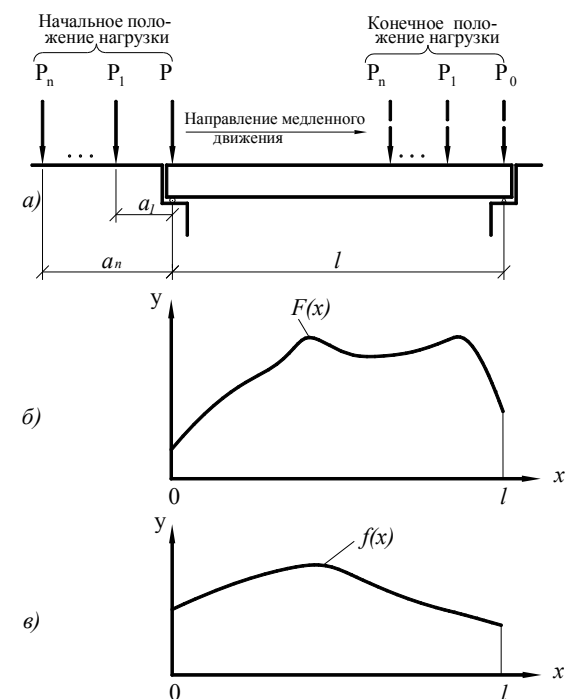


Рис. 1. Схема загрузки пролётного строения испытательной нагрузкой с целью построения натуральных линий влияния:

а) - схема испытательной нагрузки (локомотив, грузовик), заданная сосредоточенными силами  $P_0, P_1, \dots, P_n$  и её исходное и конечное положения в процессе загрузки;

б) - график функции загрузки  $F(x)$  (осциллограмма);

в) - искомая линия влияния  $f(x)$ .

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 оси  $P_0$ , 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 оси. 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 записанное в общем виде решение (3) для колёсных нагрузок и решение (5) для гусеничных нагрузок – это не уравнения, как может показаться, а именно выражения. Следует это из того, 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).

С целью проверки правильности полученных решений был выполнен численный эксперимент. Он состоял в следующем.

Для простой балки на двух опорах с пролётом  $l=32$  м, у которой очертание линии влияния изгибающего момента в четверти пролёта точно известно (треугольное с основанием  $l=32$  м и вершиной с координатами  $x=8$  м;  $y=6$  м), была рассчитана функция  $F(x)$  и построены её графики для двух случаев:

- 1) загрузка балки колёсной нагрузкой (грузовик КрАЗ) по схеме, представленной на рис.2;
- 2) загрузка балки тяжёлой гусеничной нагрузкой НГ-60, как показано на рис. 3.

Расчёт значений функции  $F(x)$  и построение по ним графиков выполнялись с использованием математического пакета MathCad по алгоритму, предложенному в статье [1].

Затем графики функции  $F(x)$  загрузки балки колёсной и гусеничной нагрузками, приведенные соответственно на рис. 2.б и рис.3.б, принимались за осциллограммы испытаний. Далее по этим графикам-осциллограммам функции  $F(x)$ , используя выражение (3) для случая загрузки балки колёсной нагрузкой и по выражению (5) для гусеничной нагрузки, были вычислены значения искомой функции  $f(x)$  - натурной линии влияния (см. рис. 2.в и рис.3.в).

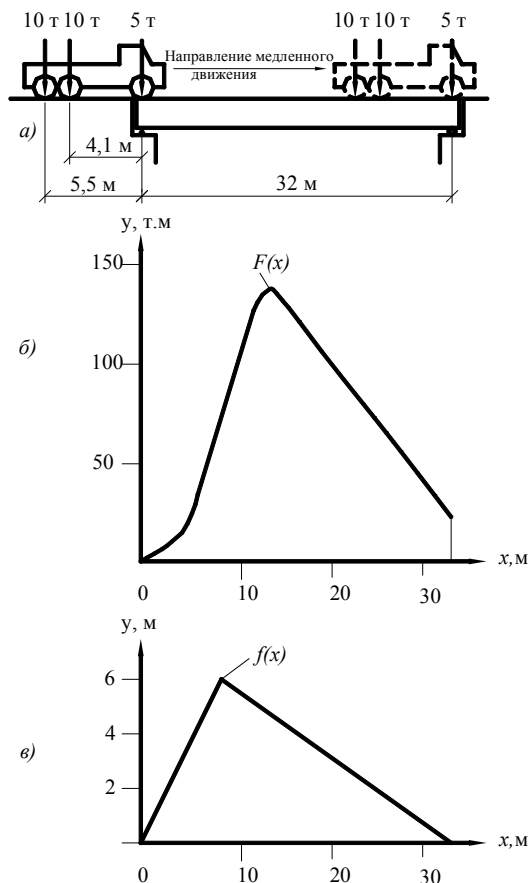


Рис. 2. Схема загрузки балки колёсной испытательной нагрузкой:  
 а) - схема нагрузки (грузовик КрАЗ) и её исходное и конечное положения в процессе загрузки;  
 б) - график функции загрузки  $F(x)$  (осциллограмма);  
 в) - искомая линия влияния  $f(x)$ .

Как и ожидалось, в обоих случаях искомая линия влияния оказалась одной и той же, полностью совпадающей с теоретической линией влияния изгибающего момента в четверти длины пролёта балки.

Это с одной стороны указывает на правильность полученных решений, а с другой - подтверждает возможность практического использования предложенного алгоритма вычисления ординат натуральных линий влияния по оцифрованным записям процесса загрузки мостовой конструкции медленно движущейся испытательной нагрузкой как колёсной, так и гусеничной.

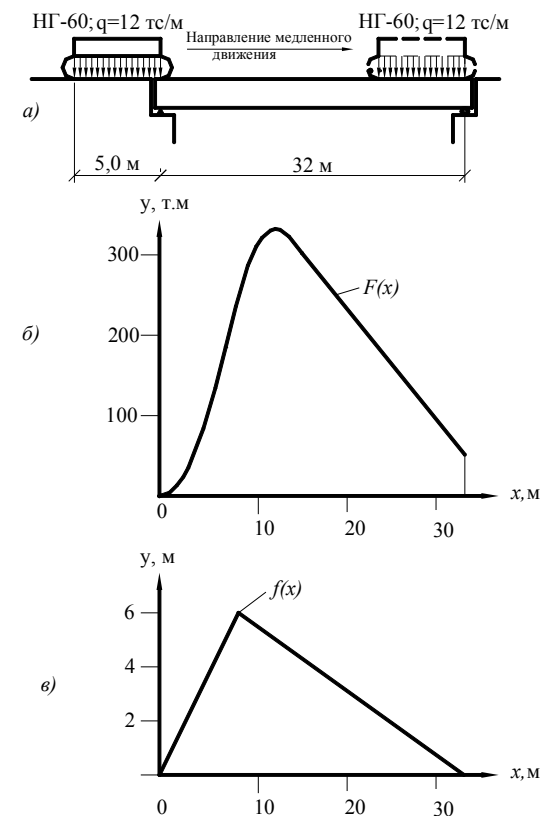


Рис. 3. Схема загрузки балки гусеничной испытательной нагрузкой:  
 а) - схема гусеничной нагрузки НГ-60 и её исходное и конечное положения в процессе загрузки;  
 б) - график функции загрузки  $F(x)$  (осциллограмма);  
 в) - искомая линия влияния  $f(x)$ .

Раньше, когда записи процессов загрузки велись исключительно на ленту осциллографа или самописца, а расшифровка (оцифровка) таких записей проводилась «вручную», предлагаемый алгоритм вычисления ординат натуральных линий влияния был бы не приемлем 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 исходная функция загрузки  $F(x)$  заносится в память компьютера в оцифрованном виде с высокой точностью при малом шаге квантования  $\Delta x$ , предлагаемый нами простой алгоритм вычисления ординат натуральных линий влияния, обеспечивает нужную точность.

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. Попробуем его найти, рассмотрев следующую задачу.

Пусть мы хотим вычислить ординаты натуральной поперечной линии влияния  $f(x)$  для пролётного строения автодорожного моста по функции-осциллограмме  $F(x)$  процесса медленного равномерного движения двухосного грузовика поперёк оси моста. В этом случае на проезжей части пролётного строения никак не может находиться только одна ось грузовика, а обязательно две (рис. 4). А раз так, то 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 давление на переднюю и заднюю оси должно быть различно, то есть  $P_1 \neq P_2$ ;

2) кроме функции-осциллограммы загрузки  $F_1(x)$  при движении грузовика слева направо кабиной вперёд (см. рис. 4.а) должна быть известна функция-осциллограмма загрузки  $F_2(x)$  при движении грузовика слева направо кузовом вперёд (см. рис. 4.б).

Если оба эти условия соблюдены, то система уравнений

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

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

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

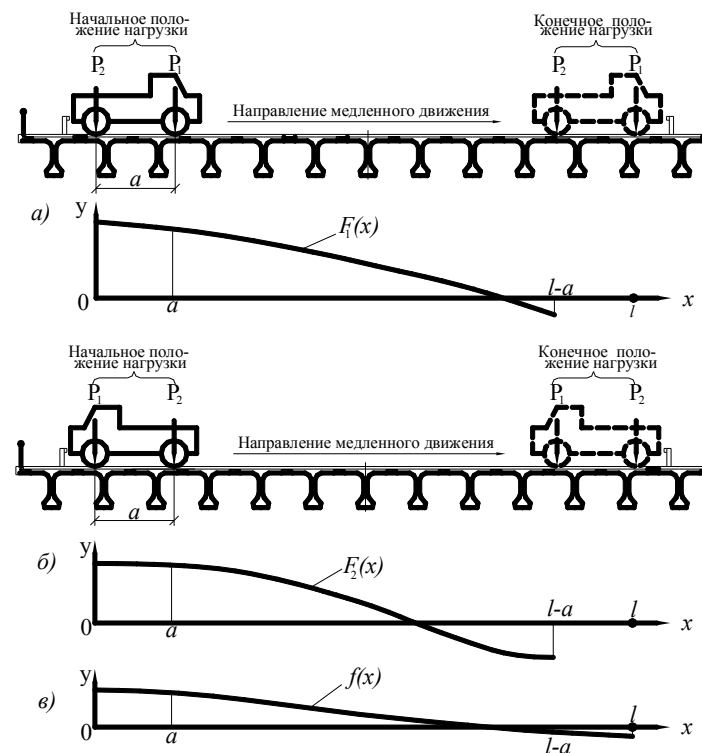


Рис. 4. Схема загрузки автодорожного пролётного строения испытательной нагрузкой с целью построения поперечных линий влияния:  
 а) - исходное и конечное положения нагрузки при её движении кабиной вперёд и соответствующий такому движению график функции загрузки  $F_1(x)$  (осциллограмма);  
 б) - исходное и конечное положения нагрузки при её движении задним ходом и соответствующий такому движению график функции загрузки  $F_2(x)$ ;  
 в) - искомая линия влияния  $f(x)$ .

Заметим, что выражение (7) определяет функцию  $f(x)$  на отрезке  $[0, l-a]$  (см. рис. 4.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  $l$ , 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

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

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 нагружений  $F_1(x)$  и  $F_2(x)$  и вычисленных по ним ординат искомой линии влияния – функции  $f(x)$ .

В заключении отметим, что приведенные выше алгоритмы вычисления ординат продольных и поперечных линий влияния по осциллограммам нагружения мостовых конструкций медленно движущейся испытательной нагрузкой ориентированы на использование математических пакетов, таких как *MachCad* и прочие, позволяющих оперативно, прямо на объекте, проводить расчёты и получать в удобной для анализа цифровой и графической форме всю необходимую информацию о фактическом характере работы сооружения под нагрузкой.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков Б. Д., Сухоруков С. Б. Определение эквивалентной нагрузки от подвижного состава для линий влияния произвольной формы // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, - Д., 2008. – Вип. 20.- С.166-168.
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.

УДК 624. 21

#### АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ АРОК И НАДАРОЧНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АРОЧНЫХ МОСТОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ ПОД НАГРУЗКОЙ И ИЗМЕНЕНИЯ ЗАЗОРОВ В ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВАХ

*В. П. Тарасенко, к.т.н., доцент, В. И. Соломка, к.т.н., с.н.с., Б. В. Савчинский  
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Днепропетровск*

Объектами исследования являлись крупнейшие арочные мосты с железобетонными арочными пролетными строениями с ездой поверху и посередине.

На Приднепровской железной дороге в пятидесятые годы прошлого века были построены по проекту Преображенского и эксплуатируются до настоящего времени два больших железобетонных моста под совмещенную езду с арочными пролетными строениями расчетной длиной 228,0 м и 140,0 м. Пролетные строения имеют езду поверху (над сводом) в двух ярусах. В верхнем ярусе надсводных строений размещаются два железнодорожных пути, а в нижнем – автопроезд с габаритом Г7 и два боковых пешеходных тротуара шириной по 2,2 м каждый. Основными несущими конструкциями пролетных строений являются коробчатые своды, имеющие верхнюю и нижнюю криволинейные плиты, две наружные и две внутренние вертикальные стенки. Надарочные строения имеют стойки нижнего яруса переменной высоты и стойки верхнего яруса, поддерживающие поперечные балки железнодорожного проезда и являющиеся продолжением стоек нижнего яруса. Продольные балки железнодорожного проезда и автопроезда являются ригелями двухъярусных продольных рам надсводных строений.

Надсводные строения имеют три поперечных шва, расположенных в четвертях пролетов и в замковых сечениях пролетных строений. Кроме этого, на указанных мостах деформационные швы устроены на концах пролетных строений в местах примыкания надсводных строений к промежуточным опорам или подходным эстакадам. Стойки надсводных строений имеют прямоугольное или двуглавное сечение. В местах размещения деформационных швов устроены сдвоенные стойки меньшего сечения. Все стойки надсводных строений жестко соединяются со сводами и не имеют специальных закреплений против продольных перемещений в точках на уровне железнодорожного проезда и автопроезда.

Третьим объектом исследования был многопролетный железобетонный мост с двумя судоходными арочными пролетными строениями расчетной длиной по 106,0 м с ездой посередине. На концевых участках арочных пролетных строений проезжая часть опирается на железобетонные стойки переменной высоты, а в средней части – на железобетонные подвески прямоугольного сечения. Железобетонные арки имеют двуглавное сечение переменной высоты. Проезжая часть пролетных строений имеет