

## Об особенностях поиска максимального значения динамического коэффициента при испытаниях мостов

Ходяков Вячеслав Андреевич, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь, xva609@gmail.com

### Аннотация:

Исходя из личного опыта многочисленных динамических испытаний и расчётов пролётных строений мостов становится понятно, что задача получения максимальной величины динамического коэффициента  $\mu$  от проезда даже одиночного самосвала на практике является крайне сложной задачей. В статье описано несколько факторов, которые необходимо учитывать, если мы ставим целью получение динамического коэффициента наиболее близкого к максимально возможному для конкретного мостового сооружения.

**Ключевые слова:** испытание, динамическая нагрузка, динамический коэффициент, динамика колебания, мост, пуптепровод.

**Первый фактор**, который стоит рассмотреть, это неоднозначность геометрического совпадения мест расположения максимальных значений абсолютного динамического прогиба и статического прогиба.

Проведём расчёт деформаций двухпролётной неразрезной балки длиной 20 метров. Прокатим по балке одиночную нагрузку и получим положение сосредоточенной силы, при которой возникает максимальный прогиб второго пролёта (Рис. 1). Расстояние от крайней правой опоры до точки установки силы составляет  $4,7L$  (где  $L = 10$  м – длина пролёта), максимальный прогиб при этом возникает в той же точке. Как показывает практика многочисленных натурных испытаний неразрезных систем мостов [1], измерительное оборудование как правило устанавливают на расстоянии  $0,4L$  от крайней опоры. В обоих случаях точка максимальных деформаций не находится в центре крайнего пролёта неразрезной системы.

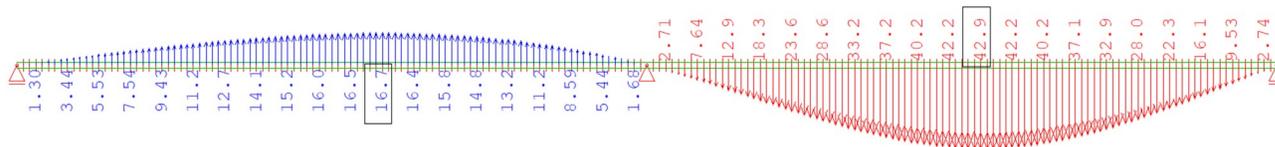


Рис. 1. Максимальные деформации при проезде одиночной нагрузки

С другой стороны, если выполнить расчёт по определению формы собственных колебаний такой конструкции, то будет видно, что максимальные деформации будут находиться в различных точках (Рис. 2). Максимальное абсолютное значение динамической добавки к условным статическим деформациям будет находиться на расстоянии  $0,5L$ ,  $0,42L$  и  $0,25L$  при первой, второй и третьей форме колебаний соответственно.

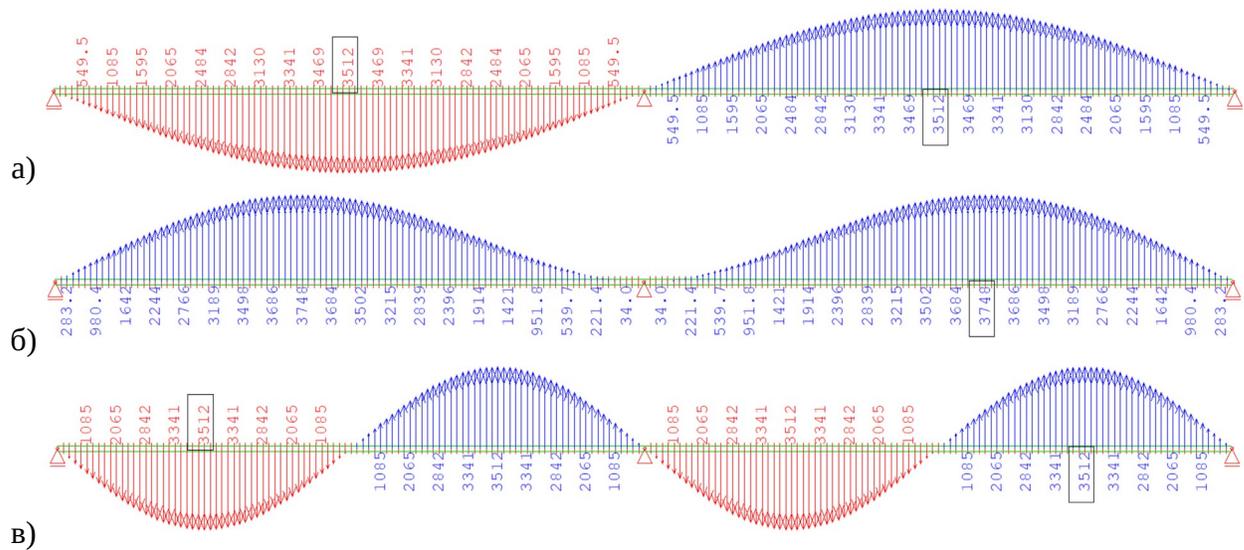


Рис. 2. Деформации балки при собственных колебаниях:  
а – первая форма; б – вторая форма; г – третья форма.

Если рассмотреть представленные выше результаты в совокупности, становится понятно, что точка возникновения максимальных статических деформаций условно никогда не совпадает с точкой возникновения максимальных динамических деформаций. Таким образом, в случае установки измерительного оборудования в точке предполагаемых максимальных статических деформаций мы не будем получать максимальной величины динамической добавки и наоборот.

Учитывая, что мы ищем относительное значение динамической добавки  $\mu$ , сложно предположить в какой конкретной точке, это значение будет наивысшим. Например, при возникновении первой формы колебаний, если доверять результатам расчётов, максимальная относительная динамическая добавка будет определяться где-то между точками  $0,47L$  и  $0,5L$ .

**Второй фактор**, это неоднозначность совпадения момента возникновения абсолютного динамического прогиба с моментом возникновения максимального статического прогиба по шкале времени.

Колебания пролётного строения возбуждаются не мгновенно, а после плавно затухают. Это приводит к тому, что максимальное значение абсолютной динамической добавки наступает лишь единожды при колебаниях от проезда автомобиля. При этом максимальное значение возмущающей силы, возникает практически сразу при проезде неровности, а максимальная динамическая добавка возникает как правило во 2 или 3 периоде колебаний пролётного строения. Эти несколько периодов тратятся на «раскачивание» пролётного строения периодической силой от транспортной нагрузки до наступления пикового значения амплитуды, затем колебания затухают.

Случай, когда это условие не выполняется можно пронаблюдать на рисунке 3 [2]. Видно, что пиковое значение динамических деформаций наступает приблизительно в момент 267,1 секунды, в то время как максимальное значение статических деформаций сильно раньше – на 266,7 секунде.

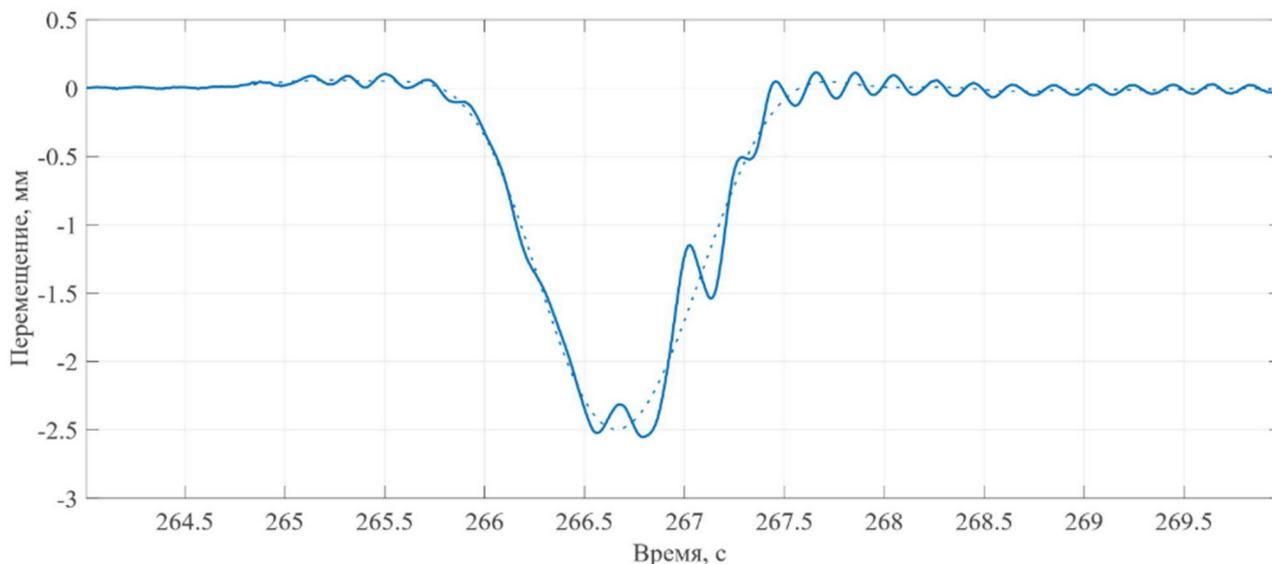


Рис. 3. График изменения прогиба балки при проведении динамических испытаний, проезд без искусственной неровности [2]

При этом в случае, если мы определяем динамическую добавку при испытании без искусственной неровности, на фактор совпадения максимумов по времени можно повлиять лишь выбором скорости движения нагрузки. В случае же если испытание проводится с искусственной неровностью этот момент можно подобрать, перемещая неровность (брус) вдоль пролётного строения.

**Третий фактор**, это фактор совпадения различных частот в колебательной системе пролёт-самосвал, при проведении динамических испытаний.

Основной причиной возникновения динамической добавки, является изменение сил, передаваемых самой подвижной нагрузкой. Так как поставлена задача получения максимального значения динамической добавки, то нужно следить за выполнением условия совпадения частот колебаний пролётного строения и возмущающей силы.

Далее попробуем разобрать несколько случаев совпадения этих частот, другими словами, случаи возникновения кратковременного резонанса. Обозначим частоту собственных колебаний пролётного строения  $f_0$ , а для приблизительной оценки примем это значение равным 3 Гц.

**Случай 1.** В качестве полупериода воздействия внешней силы примем время прохождения нагрузкой дистанции, равной длине одного пролёта. Тогда частотой вынуждающей силы будет величина  $f_{np}$ , которая находится как отношение скорости движения автомобиля к двум длинам пролёта.

Если принять длину пролёта 24 м, а частоты колебаний  $f_{np}$  и  $f_0$  равными, то получим скорость 144 м/с или 518 км/ч, что является очень большим значением.

Если же рассмотреть пролётное строение длиной 6 м, то получим уже скорость 36 м/с или 130 км/ч что всё ещё много, не уже может быть достигнуто.

**Случай 2.** В качестве частоты возмущающей силы примем частоту колебания неподрессоренной массы автомобиля  $f_{кл}$ , неопределённость которой связана с конструктивными особенностями автомобилей. Однако, принимая во внимания фактор существования стандартизированного «Золотого автомобиля» [3] с конкретными характеристиками, достоверность которых, с учётом региональных особенностей, уже доказана в более ранних исследованиях [4,5], эта частота имеет вполне конкретное значение

порядка 11 Гц. Однако, с учётом того, что величина подрессоренной массы относительно мала, величина динамической добавки от совпадения этих частот не будет иметь высокого значения.

**Случай 3.** В качестве частоты вынуждающей силы примем частоту колебания подрессоренной массы автомобиля  $f_{mл}$ , которая так же может быть получена из параметров «Золотого автомобиля» и представляет с собой значение порядка 1,2 Гц. Эта частота колебания существенной части подвижной нагрузки, что, как следствие, существенно влияет на величину динамической добавки.

**Случай 4.**

В качестве частоты вынуждающей силы примем частоту воздействия отдельных осей автомобиля  $f_{oc}$  на центр пролётного строения или небольшую выбоину. Эта частота находится как отношение скорости движения автомобиля к расстоянию между соседними осями автомобиля [6].

Если принять частоты колебаний  $f_{oc}$  и  $f_0$  равными, а расстояние между осями 1,4 м (расстояние между задней парой наиболее тяжело нагруженных осей грузового автомобиля типа МАЗ 5516), то получим значение скорости 4,2 м/с или 15 км/ч, что лежит в пределах диапазона действительной скорости движения автомобилей.

Рассматривая колёсную базу МАЗ 5516 и приняв расстояния между 1 и 2 осями 3,35 м, получим скорость проезда 36 км/ч, а для расстояния между 1 и 3 осями 4,75 м, получим скорость проезда 51 км/ч

При этом стоит помнить, что расстояние между осями может быть достаточно разнообразным. Хотя, возможно, это лишь на первый взгляд.

**Случай 5.**

В качестве 3/4 периода воздействия силы примем время прохождения нагрузкой глубокой выбоины с крутыми краями [7]. Тогда частотой вынуждающей силы будет величина  $f_{об}$ , которая находится как отношение скорости движения автомобиля к 4/3 длины выбоины.

Если принять длину выбоины 0,5 м, а частоты колебаний  $f_{об}$  и  $f_0$  равными, то получим скорость 2 м/с или 7 км/ч, что лежит в пределах диапазона действительной скорости движения автомобилей.

Если изобразить графически величину динамической добавки для условного пролётного строения с характеристиками, описанными выше, то получим график (Рис. 4). График представляет гипотетическую модель, величины пиковых значений могут иметь другие величины относительно друг друга, также они могут иметь другой порядок и положение по оси абсцисс.

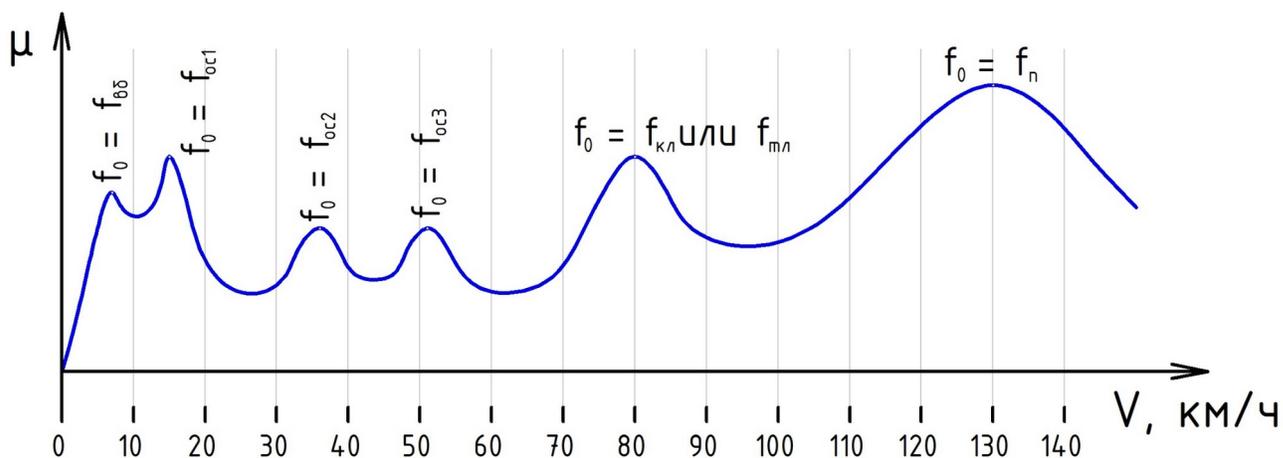


Рис. 4. Общий вид гипотетического графика зависимости величины динамической добавки от скорости движения автомобиля

Следует учесть, что могут иметь место и другие особые случаи возникновения периодических сил, воздействующих на пролётное строение. С другой стороны, необходимо обязательное натурное изучение описанных в данной работе случаев для подтверждения влияния и значимости описанных факторов в формировании динамической добавки.

Дополнительным предметом для дальнейших размышлений и практического изучения может стать влияние возникновения резонанса подрессоренной и неподрессоренной масс автомобиля с внешними силами, создаваемыми неровностями асфальтобетонного покрытия или другими факторами.

#### Литература:

1. Технический отчет №7805/2022 по результатам обследования и испытания законченной реконструкцией путепровода на объекте «Реконструкция путепровода по просп. Победителей через ул. М. Богдановича в г. Минске» / Т. А. Рубцова [и др.] / Государственное предприятие «БелдорНИИ». – Минск, 2022. – 104 с.
2. Технический отчет №7344/2021 по результатам обследования с испытанием путепроводов №1 и №2 на объекте «Строительство путепровода-дублёра ул. Якубовского-Загородное шоссе в г. Могилёве» / А. В. Семененко [и др.] / Государственное предприятие «БелдорНИИ». – Минск, 2021. – 140 с.
3. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности : ГОСТ 33101-2014. – Введ. 01.04.2017 (введен впервые). – Москва : ФГБОУ учреждение высшего профессионального образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет" (МАДИ), 2016. – 24 с.
4. Ходяков, В. А. О достоверности стандартных параметров модели «Золотого» автомобиля для расчета показателя IRI / В. А. Ходяков // Новые горизонты 2023 : Сборник материалов Белорусско-Китайского молодёжного форума, Минск, 9-10 ноября 2023 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2023. – С. 70 – 72
5. Ходяков, В. А. Комплексная методика оценки деформаций асфальтобетонного покрытия на мостовых сооружениях с использованием метода наземного лазерного сканирования / В. А. Ходяков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова), Белгород, 16-17 мая 2023 г. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2023. – С. 359–362.
6. Способ динамических испытаний пролётных строений : пат. RU 2608332 С / М.Л. Хазанов, А.В. Леви, А.А. Курыпов, А.В. Лысенков, С.А. Хохлов, Л.С. Коростелева, Т.В. Медведева. – Оpubл. 17.01.2017.
7. Павуков Ю.И., Ходяков В.А. Вибродиагностика опор мостовых сооружений // Автомобильные дороги и мосты. 2023 №2 (32). – С. 6 – 12.