

ПРОБЛЕМЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ НЕОБХОДИМОСТЬ ЗАМЕНЫ НОРМАТИВНЫХ ВРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК АК ДЛЯ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Стаття присвячена аналізу нових тимчасових нормативних навантажень автодорожніх мостів, визначенню динамічного коефіцієнту та проблемам використання цих навантажень для розрахунку витривалості і визначення залишкового ресурсу елементів мостових споруд.

Статья посвящена анализу новых временных нормативных нагрузок автодорожных мостов, определению динамического коэффициента и проблемам использования этих нагрузок при расчете выносливости и определение остаточного ресурса элементов мостовых сооружений.

The article is devoted to the analysis of new temporal normative loads of high-way bridges, the determination of dynamic coefficient and the problems of the using these loads in calculation of endurance and determination of remaining resource of elements of bridge structures.

1. Эволюция нормативных временных нагрузок в России. Достоинства и недостатки нормативных временных нагрузок в виде реального поезда транспортных средств

Нормативные временные вертикальные нагрузки от подвижного состава на автомобильных дорогах изменяются во времени с тенденцией постоянного их возрастания. Их изменение в России за период с 1931 по 1962 год приведено на рис. 1.

До 1986 года в качестве нормативных нагрузок на автодорожные мостовые сооружения принимались колонны практически реальных автомобилей с указанием расстояний между ними, положения осей автомобилей и нагрузок на них в тс.

Численное значение любого силового фактора N в элементах мостовых сооружений от такой нормативной нагрузки в виде произвольного поезда автомобилей, расположенных между собой на установленных расстояниях, при использовании линии влияния соответствующего силового фактора строго вычислялся по следующей очевидной формуле:

$$N_{\text{норм}} = \eta \sum P_i y_i, \quad (1)$$

где P_i – нормативные нагрузки на оси транспортных средств, входящих в состав реального поезда транспортных средств; y_i – ординаты линии влияния под соответствующими осями транспортных средств при критическом её загрузении; η – коэффициент поперечной установки, вычисляемый от расчетного количества полос движения с учетом конструктивной формы мостового сооружения.

Расчетное значение того же силового фактора от той же реальной нагрузки вычислялся с использованием следующей очевидной формулы:

$$N_{\text{расч}} = \eta(1 + \mu) \gamma_f \sum P_i y_i, \quad (2)$$

где $(1 + \mu)$ – численное значение динамического коэффициента, вычисляемое с учетом конструктивной формы сооружения, его материала по имеющимся эмпирическим формулам, полученным на основе обработки экспериментальных данных и теоретических положений динамики сооружений; γ_f – коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый для реального поезда транспортных средств на основе физических соображений по возможным перегрузкам осей транспортных средств или изменению расстояний между ними при различных реальных ситуациях.

Важным достоинством нормативных нагрузок такого вида являлось то, что разнообразные мостовые сооружения с различными пролетами и все их элементы проектировались на воздействие одной и той же практически реальной установленной нормативной нагрузки. При введении в эксплуатацию все мостовые сооружения имели одинаковую степень обеспеченности их грузоподъемности.

В качестве недостатка таких нормативных нагрузок по условиям работы инженеров в условиях 1962-1986 гг., когда вручную загружались линии влияния, отмечалась трудность определения критического положения нагрузки по формуле (1).

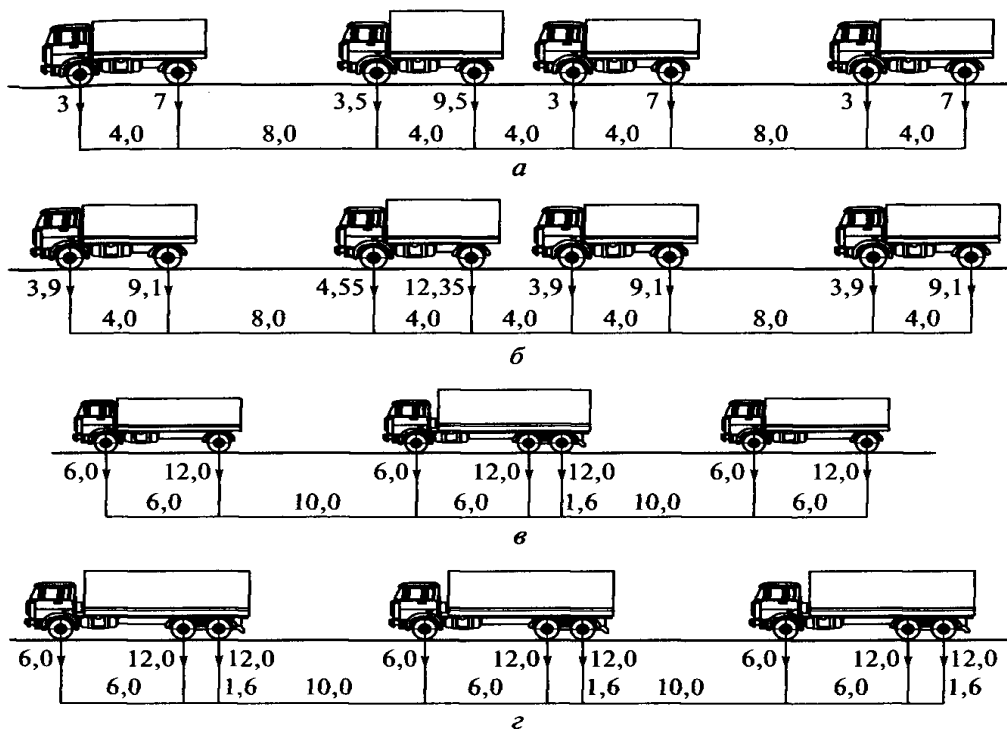


Рис. 1. Эволюция схем временных нагрузок для автодорожных мостов:
а – Н-10(нормы 1931 г.); *б* – Н-13(нормы 1938 г.); *в* – Н-18(нормы 1953 г.); *г* – Н-30(нормы 1962 г.)

2. Проблемы использования введенных в 1986 и 2008 годах временных нормативных нагрузок типа АК при вычислении нормативных значений силовых факторов, требуемых при проектировании разнообразных мостовых сооружений

В интересах облегчения загрузки линий влияния силовых факторов вручную в январе 1986 г. вместо достаточно реальной нагрузки

Н-30 в качестве нормативной временной нагрузки на автодорожные и городские мосты была введена условная нагрузка в виде полос нагрузки АК (рис. 2), каждая из которых включала одну двухосную тележку с нагрузкой на ось P , равной $9,81K$, кН и равномерно распределенную нагрузку интенсивностью v (на обе колеи), равной $0,98K$, кН/м [2].

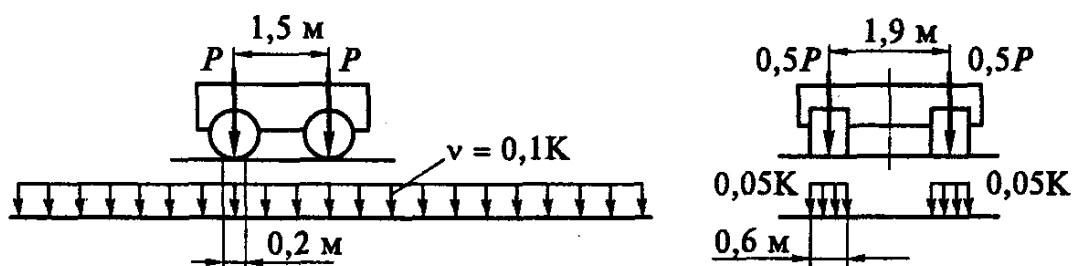


Рис. 2. Схема условной нормативной нагрузки АК

Класс К этой комбинированной нормативной нагрузки, состоящей из равномерно распределенной нагрузки и тележки, определяется путем приравнивания воздействия нормативного поезда автомобилей к воздействию условной нормативной комбинированной единичной нагрузки А1 при пропуске этих нагрузок по разным формам линий влияния с использованием следующей формулы:

$$K = \frac{\eta \sum P_i y_i}{\eta (N_{1p} + N_{1q})} = \frac{\sum P_i y_i}{(N_{1p} + N_{1q})}, \quad (3)$$

где N_{1p} – усилие в элементе от воздействия тележки нормативной нагрузки А1; N_{1q} – усилие в элементе от равномерно распределенной нагрузки нормативной нагрузки А1.

Численное значение класса нагрузки при этом оказывается зависимым от состава колонны транспортных средств, распределения нагрузки между их осями, расстояний между транспортными средствами, длины и формы линии влияния. По своей физической сути получаемое значение K – своеобразная эквивалентная нагрузка, отнесенная к условной (виртуальной) единичной нагрузке, принятой в виде равномерно распределенной нагрузки по всей длине линии влияния и единичной тележки,

устанавливаемой над максимальными ординатами линий влияния.

На рис. 3 приведены полученные мною по формуле (3) графики классов виртуальной нагрузки от колонны из 9 автомобилей нормативной нагрузки Н-30 в зависимости от длины и формы линий влияния. Нижний из них соответствует треугольной линии влияния с вершиной в середине её длины, а верхний – треугольной линии влияния с вершиной в её начале.

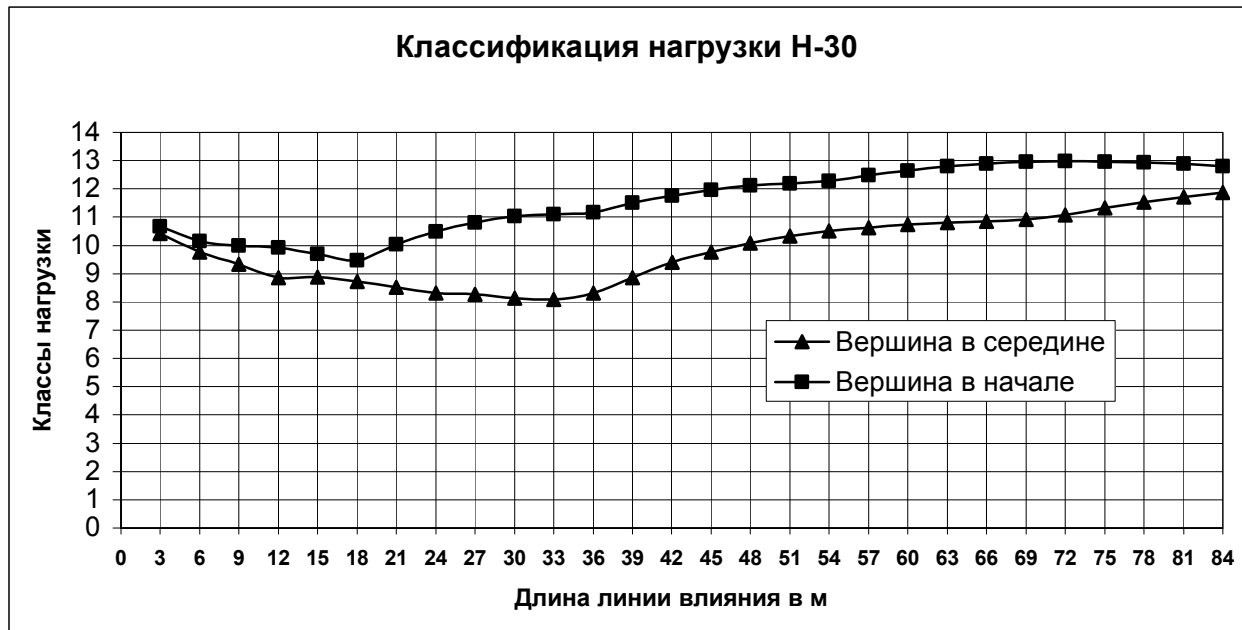


Рис. 3. Классы нормативной нагрузки Н-30 в единицах виртуальной нагрузки А1 в зависимости от формы и длины линий влияния

Заметим, что от одной и той же нормативной нагрузки в виде поезда автомобилей Н-30 класс виртуальной нагрузки для разных длин и форм линий влияния различен. Заметим также, что численное значение класса виртуальной нагрузки, создаваемого практически реальной нагрузкой Н-30, при загрузке треугольной линии влияния с вершиной посередине в зависимости от её длины изменяется от 8 до 12, а при загрузке треугольной линии влияния с вершиной в начале от 9,5 до 13.

Из нижеприведенной формулы (4) следует, что при использовании точных значений классов виртуальной нагрузки, представленных на рис. 3, соответствующих рассматриваемой длине линии влияния, представлялось возможным вычислить точное значение любого силового фактора от нагрузки в виде поезда реальных автомобилей.

Но для этого необходимо было иметь таблицы классов нагрузки в зависимости от длины

и формы линий влияния, как это имеет место для железнодорожных мостов.

$$N_{\text{норм}} = \eta K (N_{1p} + N_{1q}) = \eta \frac{\sum P_i y_i}{(N_{1p} + N_{1q})} (N_{1p} + N_{1q}) = \eta \sum P_i y_i. \quad (4)$$

В [2] класс виртуальной нагрузки в интересах упрощения расчетов был установлен постоянным и равным 11 для разных длин и разных форм линий влияния. В соответствии с этими нормами все мостовые сооружения и их элементы проектируются на одну и ту же виртуальную нагрузку, независимо от формы и длины линий влияния усилий. В разрабатываемом проекте свода правил на проектирование мостовых сооружений в соответствии с национальным стандартом (ГОСТ Р 52748-2007) для автотранспортных мостовых сооружений введен класс виртуальной нагрузки АК равный 14 также независимо от формы и длины линий влияния.

Выше было доказано, что класс виртуальной нагрузки от воздействия нормативной нагрузки в виде поезда автомобилей различен для различных длин линий влияния и их форм. Рассмотрим и решим теперь обратную задачу. Если классы виртуальной нагрузки зависят от длины и формы линий влияния, то, что тогда означает, что все мостовые сооружения и их элементы проектируются на постоянный класс виртуальной нагрузки?

На рис. 4. приведено решение этой задачи применительно к двум классам постоянных виртуальных нагрузок (A11 и A14) для двух

разных форм линий влияния в диапазоне их длин от 3 до 84 м. Два нижних графика представляют зависимость массы реальных автомобилей в нормативной их колонне по схеме Н-30 от разных длин и двух форм линий влияния, которая создается постоянной виртуальной нагрузкой A11. Два верхних графика представляют зависимость массы реальных автомобилей в нормативной их колонне по схеме Н-30 от разных длин и двух форм линий влияния, которая создается постоянной виртуальной нагрузкой A14.

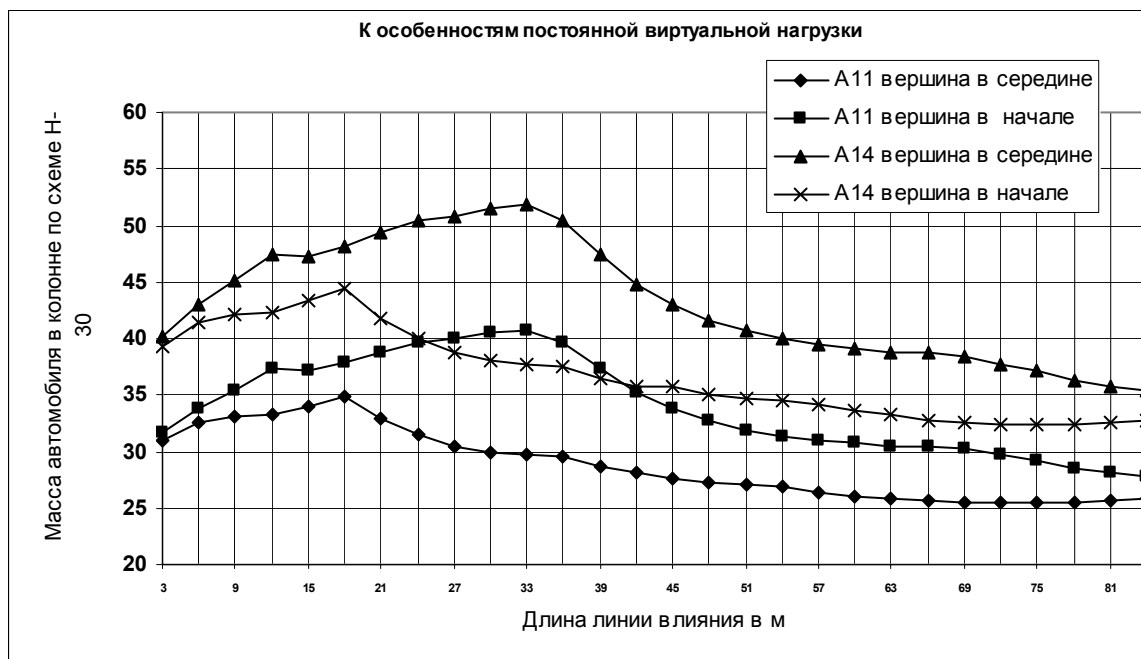


Рис. 4. Зависимость возможной массы автомобилей в колонне по схеме Н-30 от длины линии влияния при принятых нормативных виртуальных нагрузках А11 и А14

Их анализ позволяет дать следующий ответ на сформулированный выше вопрос: проектирование всех мостовых сооружений и их элементов на постоянный класс виртуальной нагрузки означает, что:

- проектирование пролетных строений с различными пролетами на постоянную виртуальную нагрузку А11 производится на различные и неизвестные проектировщикам нормативные нагрузки в виде поезда реальных автомобилей массой от 26 до 42 т;
- проектирование пролетных строений с различными пролетами на постоянную виртуальную нагрузку А14 производится на различные и неизвестные проектировщикам нормативные нагрузки в виде поезда реальных автомобилей массой от 32 до 52 т;
- проектирование элементов одного и того же мостового сооружения с принятым про-

летом выполняется на различные и неизвестные проектировщикам нормативные нагрузки в виде поезда реальных автомобилей. Это особенно опасно для элементов вантовых мостов, линии влияния усилий в которых имеют существенно различную форму и длину;

– усилия предварительного натяжения в предварительно напряженных железобетонных пролетных строениях разных пролетов определяются от воздействия различных и неизвестных проектировщикам нормативных нагрузок в виде поезда реальных автомобилей. Это весьма опасно, так как еще до приложения временных нагрузок в их сечениях могут возникать недопустимые сжимающие и растягивающие напряжения, способные привести сооружение в аварийное состояние;

– пролетные строения разных пролетов и их элементы в итоге имеют разную и неизвест-

ную проектировщику степень обеспеченности несущей способности на воздействие реально проходящих транспортных средств; возникает вопрос, какие знаки их грузоподъемности ставить перед новыми мостами на одной и той же дороге, проектируемой на одну и ту же виртуальную нагрузку? Ведь на одной и той же дороге построенные новые мосты с использованием постоянной виртуальной нагрузки будут иметь различную грузоподъемность!

Рассмотрим теперь еще один вопрос. К чему приводит ситуация, когда, например, нормативная нагрузка Н-30 в виде поезда автомобилей заменена нормативной виртуальной нагрузкой А11.

Применительно к реальной нагрузке Н-30 и её виртуальному аналогу ответ вытекает из сопоставления точных (находящихся на кривых линиях рис. 3) и установленных [2] (находящихся на линии, соответствующей классу 11) классов виртуальной нагрузки:

– элементы мостовых сооружений, численные значения силовых факторов которых определяются с использованием треугольных линий влияния с вершиной в середине их длины, в диапазоне пролетов разрезных и неразрезных пролетных строений до 63 м проектируются на нагрузки, превышающие нормативные реальные нагрузки на 3...37,5 %, а в диапазоне пролетов от 75 до 84 м на нагрузки не достигающие нормативных реальных нагрузок на 3...9 %;

– элементы мостовых сооружений, численные значения силовых факторов которых определяются с использованием треугольных линий влияния с вершиной в начале их длины, при пролетах до 30 м проектируются на нагрузки близкие к реальным и при пролетах более 30 м на нагрузки не достигающие реальных до 18 %.

Из выполненного анализа следует, что использование усредненных, или как их называют средневзвешенных, значений классов виртуальной нагрузки создает ситуации экономических рисков противоположных знаков, возможные последствия которых никто не исследовал.

Ведь запасы несущей способности у пролетных строений с разными пролетами и у разных элементов одних и тех же пролетных строений при использовании постоянных виртуальных нагрузок разные и при некоторых пролетах неприемлемы!

Если есть желание иметь какой-то дополнительный запас, то установите с запасом реаль-

ную нормативную нагрузку и проектируйте на нее все виды пролетных строений и их элементов. Степень надежности всех пролетных строений и их элементов будет одинакова. Перед мостами можно уверенно ставить достоверные знаки их грузоподъемности.

При использовании же постоянных виртуальных нагрузок степень надежности всех даже новых пролетных строений различна и неопределенна. Ведь на одной и той же дороге построенные новые мосты с использованием постоянной виртуальной нагрузки имеют различную грузоподъемность!

Вывод по п. 2:

1. Установление постоянного класса виртуальной нагрузки для различных длин и форм линий влияния из желания упростить расчеты приводит к тому, что пролетные строения с разными пролетами и их элементы проектируются на различные и не известные проектировщику нормативные нагрузки в виде поезда автомобилей.

2. Очевидное упрощение расчетов не оправдывает себя, в силу указанной выше неопределенности условий проектирования пролетных строений разных пролетов и их элементов.

3. Установленный национальным стандартом класс виртуальной нагрузки АК в виде постоянной величины вне связи с длиной и формой линий влияния не обеспечивает адекватных значений силовых факторов от нормативной нагрузки в виде поезда перспективных автомобилей, что вызывает необходимость её замены.

3. Проблемы учета динамических коэффициентов и коэффициентов надежности по нагрузке при вычислении расчетных силовых факторов с использованием введенных нормативных виртуальных нагрузок

Предварительно отмечу, что для строгого учета динамического взаимодействия транспортных средств с пролетными строениями мостов, необходимо знать ряд их параметров, влияющих на формирование частоты сил, возбуждающих колебания пролетных строений при проезде транспортных средств по мостовому сооружению. К ним, в первую очередь, следует относить данные о распределении массы транспортного средства между его осями, данные о жесткости подвесок или рессор кузова. Этих данных, к сожалению, в российских нормах проектирования мостов не было никогда. При совершенствовании норм проектирования крайне необходимо введение в нормы данных о

разнообразных динамических характеристиках транспортных средств. Нормативная нагрузка в формате АК непригодна для этого, так как она содержит не реальные, а виртуальные элементы нагрузки. В этом я вижу еще один повод для замены нормативной нагрузки в формате АК нормативной нагрузкой, приближенной по физическому смыслу реальному поезду транспортных средств.

При использовании же нормативной нагрузки АК расчетное значение любого силового фактора в элементах мостовых сооружений от реальной нагрузки представлялось возможным вычислить с использованием точного класса виртуальной нагрузки при загрузении соответствующей линии влияния по следующей очевидной формуле, дающий тот же результат вычислений, что и при использовании не виртуальной, а реальной нагрузки:

$$\begin{aligned} N_{\text{расч}} &= \eta(1+\mu)\gamma_{fp}K(N_{1p} + N_{1q}) = \\ &= \eta(1+\mu)\gamma_{fp} \frac{\sum P_i y_i}{(N_{1p} + N_{1q})} (N_{1p} + N_{1q}) = \\ &= \eta(1+\mu)\gamma_{fp} \sum P_i y_i. \end{aligned} \quad (5)$$

Заметим, что в вышеприведенной формуле динамический коэффициент и коэффициент надежности по нагрузке, численные значения которых определяются для реальной нагрузки на основе ясных физических соображений, используется для виртуальной нагрузки в равной мере, как для тележки, так и для равномерно распределенной нагрузки. При этом строгом учете физики явления обеспечивается равенство результатов вычисления силовых факторов при использовании реальной нагрузки и виртуальной нагрузки с точным значением её класса.

Но так как класс виртуальной нагрузки установлен постоянным для разных длин и форм линий влияния, то это уже вносит элемент неопределенности.

Кроме того, в действующих нормах [3] с моей точки зрения, необоснованно введены различные динамические коэффициенты и коэффициенты надежности для элементов виртуальной нагрузки. В проекте новых норм предлагается ввести один динамический коэффициент только к виртуальной тележке без необходимых физических обоснований.

Считаю, что выделить динамические коэффициенты для тележки и для равномерно распределенной нагрузки по физическим соображениям не представляется возможным, так как эти нагрузки виртуальны, они не существуют и

поэтому не могут создавать динамические эффекты.

Тем не менее, в действующих нормах [3] и в проекте СП 2009 предлагаются различные значения этих коэффициентов для равномерно распределенной нагрузки и для тележки.

Их численные значения при этом авторами СП 2009 определяются на основе математических соображений из нижеприведенного условия равенства численных значений расчетных силовых факторов от реальной и виртуальной нагрузок:

$$\eta(1+\mu)\sum P_i y_i = \eta K(N_{1p} k_p + N_{1q} k_q), \quad (6)$$

где $(1+\mu)$ – динамический коэффициент от реальной нагрузки, численное значение которого определяется по эмпирическим формулам в зависимости от величины пролета и материала пролетных строений; k_p, k_q – численные значения условных коэффициентов, используемых для учета динамического воздействия виртуальной нагрузки.

Далее принимается для равномерно распределенной нагрузки $k_q = 1$ и из полученного уравнения находится требуемое значение коэффициента k_p , при котором будет иметь место равенство:

$$(1+\mu)\sum P_i y_i = K(N_{1p} k_p + N_{1q}). \quad (7)$$

После подстановки значения K в уравнение (7) и сокращения на $\sum P_i y_i$ получим:

$$N_{1p} k_p = (1+\mu)(N_{1p} + N_{1q}) - N_{1q}. \quad (8)$$

Откуда получим:

$$K_p = (1+\mu) \left(1 + \frac{N_{1q}}{N_{1p}} \right) - \frac{N_{1q}}{N_{1p}} = (1+\mu) + \mu \frac{N_{1q}}{N_{1p}}. \quad (9)$$

Для изгибающего момента в любых пролетных строениях этот коэффициент будет иметь следующий вид:

$$K_p = (1+\mu) + \mu \frac{M_{1q}}{M_{1p}}, \quad (10)$$

а для разрезных пролетных строений с учетом схемы единичной виртуальной нормативной нагрузки с тележкой при $P = 1$ тс, расстояния между осями тележки 1,5 м и равномерно распределенной нагрузки $q = 0,1$ тс/м

$$K_p = (1 + \mu) + \mu \frac{M_{1q}}{M_{1p}} = (1 + \mu) + \mu \frac{L^2}{80(L/2 - 0,75)}. \quad (11)$$

На рис. 5. приведены графики численного значения этого условного коэффициента и его компонентов для железобетонных и металлических пролетных строений при использовании нижеприведенных формул для динамического

коэффициента в зависимости от величины пролета:

– для железобетонных пролетных строений (с учетом норм Японии):

$$(1 + \mu) = 1 + \frac{7}{20 + L}; \quad (12)$$

– для металлических пролетных строений (СНиП 2.05.03-84*):

$$(1 + \mu) = 1 + \frac{15}{37,5 + L}. \quad (13)$$

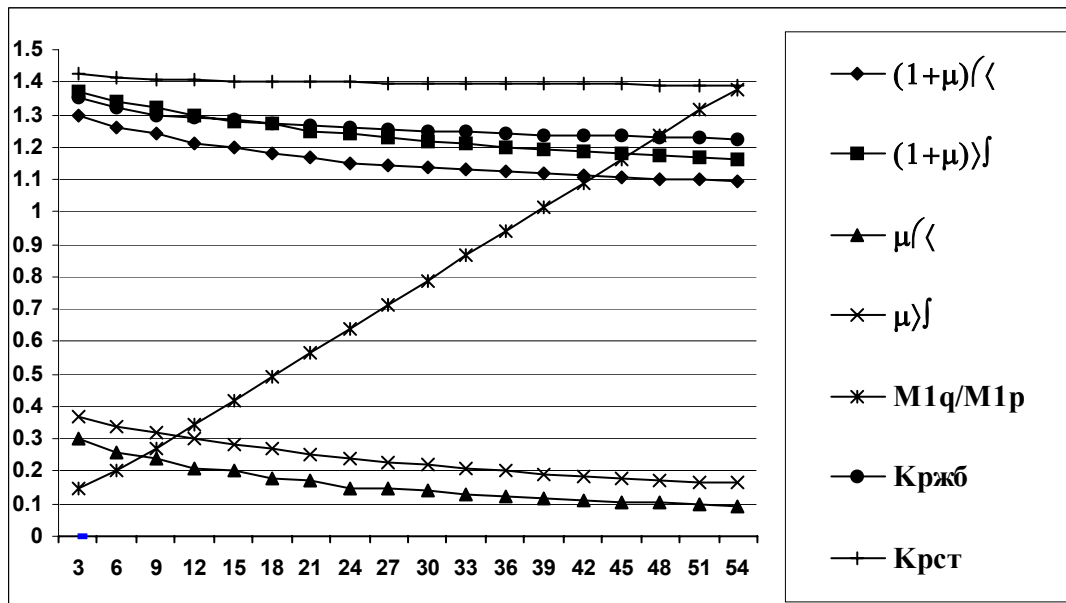


Рис. 5. График значений коэффициента K_p и его компонентов в зависимости от величины пролетов для железобетонных и металлических пролетных строений

При рассмотрении данных этих графиков таблицы видна существенная зависимость динамических коэффициентов $(1 + \mu)$ от величины пролета и материала пролетных строений, что согласуется с теоретическими положениями динамики сооружений.

Обнаруживается и относительное постоянство значений коэффициента K_p в функции величины пролета с учетом влияния второго члена формулы (11). Это послужило авторам СП 2009 основой для включения коэффициента K_p в качестве динамического коэффициента, что недопустимо с физической точки зрения. Динамический коэффициент зависит от величины пролета и материала сооружения, а также от многих других факторов, которые следует учитывать в расчетах в будущем на основе дополнительных исследований.

Введение в новые нормы проектирования коэффициента K_p в качестве динамического недопустимо по физическим соображениям,

математические соображения в рассмотренном случае приводят к нарушению физики явления.

Кроме того, и это очень важно, введение такого коэффициента в нормы проектирования поставит инженера проектировщика в положение, при котором он должен будет им пользоваться в противоречии с его знаниями по динамике сооружений.

Выводы по п. 3:

1. Введение коэффициента K_p в нормы проектирования мостов в качестве динамического недопустимо по физическим соображениям и вступает в противоречие со знаниями инженеров по динамике сооружений.

Во вновь разрабатываемых нормах проектирования мостовых сооружений необходимо лишь скорректировать имеющиеся эмпирические формулы для динамических коэффициентов, полученные при массовых динамических испытаниях мостовых сооружений из различных материалов и различных систем, и исполь-

зовать их в равной мере к обоим компонентам виртуальной нагрузки АК. При этом в новом СП 2009 связь динамических коэффициентов необходимо устанавливать в функции не длины линии влияния усилия, а величины пролетов, оказывающих влияние на частоту собственных колебаний.

2. Физически и методически обоснованные коэффициенты надежности по нагрузке, полученные ранее для реальных транспортных средств, должны также по изложенным выше физическим соображениям использоваться в равной мере к обоим элементам виртуальной нагрузки АК.

4. Проблемы использования введенных временных нормативных нагрузок при расчете выносливости элементов мостовых сооружений и при определении их остаточного ресурса

Расчет выносливости элементов мостовых сооружений и определение их остаточного ресурса возможен только при использовании реального размаха напряжений в элементах от воздействия реальных временных и постоянных нагрузок. Эти размахи напряжений создаются реально проходящими транспортными средствами. Они различны от различных транспортных средств. Накопления повреждений в элементах пролетных строений зависят от численности каждого вида транспортных средств.

Введенные нормативные нагрузки являются виртуальными, они не дают возможность определить реальный размах напряжений в элементах мостовых сооружений и поэтому не пригодны для расчетов на выносливость и на определение остаточного ресурса.

Для создания возможности производить адекватные расчеты на выносливость и определение остаточного ресурса необходимо в нормы проектирования ввести несколько групп нормативных нагрузок в виде достаточно реальных колонн автомобилей с различными массами. Наибольшая по массе группа должна быть использована для вычисления максимальных значений силовых факторов во всех элементах мостовых сооружений, по которым будут определены размеры всех элементов мостовых сооружений по условию прочности и устойчивости на общее и местное действие этой нагрузки. Остальные группы вместе с первой будут использованы для расчетов на выносливость элементов с учетом их вклада в накопле-

ние относительных повреждений в элементах конструкций.

Вывод по п. 4:

1. Нормативная нагрузка в формате АК не позволяет определить реальный размах напряжений в элементах мостовых сооружений, и поэтому не пригодна для расчетов на их выносливость и на определение их остаточного ресурса.

5. Заключение

1. Нормативная нагрузка для автодорожных мостов в современном виртуальном формате АК не обеспечивает возможности проектировать разнообразные мостовые сооружения и их элементы на одинаковые перспективные нагрузки, создала условия, при которых проектировщики не знают, на какую реальную нагрузку проектируются мостовые сооружения и их элементы, что создает экономические риски противоположных знаков.

2. Динамические коэффициенты и коэффициенты надежности по нагрузке представляется возможным назначить, определить экспериментально или теоретически для конкретного автомобиля или колонны автомобилей. По физическим соображениям не представляется возможным установить их численных значений для элементов виртуальной нагрузки в формате АК.

3. Нормативная нагрузка в формате АК, являясь виртуальной, не может быть использована для достоверных расчетов мостовых сооружений на их выносливость и срок их службы.

4. Необходимы постановка и выполнение научной работы с целью обоснования нормативных нагрузок для автодорожных мостовых сооружений с учетом перспективы их развития в ином, чем АК формате, лишенных выявленных в данной статье недостатков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб [Текст]: СН200-62. – М.: МПС, 1962. – 328 с.
2. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы [Текст]. – М.: Госстрой СССР, ЦИПТ, 1985. – 200 с.
3. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы [Текст]. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. – 214 с.

Поступила в редколлегию 31.03.2010.

Принята к печати 07.04.2010.