

УДК 004.942

МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ПО МОСТУ КАК ОСНОВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКИ НА МОСТ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ОХРАНЫ ТРУДА

А.В. Полярус, профессор, д.т.н., В.В. Барчан, ассистент, ХНАДУ

Аннотация. Рассмотрены типовые виды нагрузок, создаваемые различными типами транспортных средств при движении по проезжей части мостовой конструкции. В интересах охраны труда составлены модели пространственно-временного распределения нагрузок различных типов транспортных средств.

Ключевые слова: транспортный поток, распределение нагрузки, моделирование, мостовая конструкция, охрана труда.

МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ ПО МОСТУ ЯК ОСНОВА ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА МІСТ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ВИМОГ ОХОРОНИ ПРАЦІ

А.В. Полярус, професор, д.т.н., В.В. Барчан, асистент, ХНАДУ

Анотація. Розглянуто типові види навантажень, що створюються різними типами транспортних засобів при русі проїзною частиною мостової конструкції. В інтересах охорони праці розроблено моделі просторово-часового розподілу навантажень різних типів транспортних засобів.

Ключові слова: транспортний потік, розподіл навантаження, моделювання, мостова конструкція, охорона праці.

A MODEL OF TRAFFIC FLOW ON A BRIDGE AS A BASIS OF PERMISSIBLE BRIDGE LOAD EVALUATION FOR REALIZING LABOUR PROTECTION REQUIREMENTS

A. Polyarus, Professor, Doctor of Engineering Science,
V. Barchan, Teaching Assistant, KhNAHU

Abstract. The article considers typical types of loads generated by various types of motor vehicles during their movement on bridge carriageways. To ensure labour protection, space-time models of load distribution for various types of motor vehicles have been developed.

Key words: traffic, load distribution, modelling, bridge structure, labour protection.

Введение

Существующие нормативно-правовые акты по вопросам охраны труда [1] требуют строгого выполнения установленных правил безопасности при строительстве и эксплуатации строений. К подобным объектам относятся мостовые сооружения, по которым передвигаются транспортные потоки. Увеличение ин-

тенсивности транспортного движения по дорогам и мостам требует учета особенностей нагрузки автомобилей на дорожное покрытие. Для различных дорог в разное время суток и времени года существуют свои закономерности движения транспортных средств. Эти закономерности могут быть описаны с помощью математических моделей. Математические модели движения транспорта по мосто-

вым сооружениям служат основой для проведения расчетов допустимых динамических нагрузок на мост в интересах выполнения требований охраны труда.

Анализ публикаций

Существует много типов моделей транспортных потоков [1], которые в основном являются стохастическими, хотя в отдельных случаях их можно считать квазидетерминированными. Эти модели являются общими и зачастую не учитывают специфику движения транспорта по особым участкам дороги, к которым относятся, в частности, мосты. Анализ движения машин по автомобильным мостам должен быть направлен на оценку характера разделенной нагрузки вдоль и поперек моста [3]. Фактически необходимо оценить параметры случайного поля по покрытию дороги на мосту [4]. Указанные факторы имеют большое значение при проектировании новых мостов и прогнозировании состояния существующих.

Согласно [2] все математические модели разделяются на три класса: модели-аналоги, модели следования за лидером и вероятностные модели.

Модели-аналоги основываются на переносе существующих физических закономерностей с одного физического процесса (например, гидродинамического) на другой (поток транспортных средств). Здесь поток представляется как некоторая физическая среда, и поэтому он называется макроскопическим.

В модели следования за лидером учитываются особенности движения каждого автомобиля, и поэтому такие модели относят к микроскопическим.

В вероятностных моделях учитывается массовый и в то же время случайный характер движения при наличии ограничений дорожной сети.

При движении на мостах количество ограничений существенно возрастает, и поэтому микроскопические модели, в которых необходимо знать поведение каждой машины, не имеют смысла. Действительно, по мостам подавляющее большинство машин движется почти одинаково без маневров и ускорений.

В таких случаях может упрощаться математическая модель движения транспорта.

Вероятностные модели также упрощаются, поскольку мост, по сути, является локальным участком дороги, на которой легко организовать получение статистических данных о движении автомобилей и тракторов.

Цель и постановка задачи

Цель работы заключается в создании стохастической модели движения машин, учитывающей специфику двух математических моделей движения транспорта, которая объединяет основные преимущества моделей-аналогов и вероятностных моделей, но имеет некоторые коренные различия.

Для решения поставленной цели представим движение одиночного автомобиля с четырьмя (или более) колесами как движение четырех или более видеоимпульсов с определенной скоростью, где амплитуде импульсов соответствует нагрузка на мост, а длительности (площадь) видеоимпульса – площадь соприкосновения колеса машины с дорогой.

Решение задачи

Модели движения транспорта для мостов в большинстве случаев должны быть либо моделями-аналогами, либо вероятностными.

В моделях движения транспорта, для которых аналогом является поток одномерной несжимаемой жидкости, средняя скорость потока в каждый момент времени должна соответствовать уравновешенному значению при данной плотности автомобилей на мосту. В этом случае модель вовсе не будет учитывать разнотипность автомобилей на мосту. Как раз последняя модель порождает разнообразные по величине нагрузки в различных частях моста, что очень важно для оценки и прогнозирования состояния моста. Попытка усложнять гидродинамическую модель приводит к необходимости решать очень сложные уравнения Навье – Стокса, но значительное увеличение достоверности моделей по характеру нагрузки получить трудно.

Физическая аналогия состоит в том, что движение одиночного автомобиля с четырьмя (или более) колесами представляем как движение четырех или более пространствен-

ных импульсов, которые перемещаются по плоскости моста с определенной скоростью. Эти импульсы могут иметь различную форму (прямоугольную, гауссовскую и т.п.). Амплитуда импульсов соответствует нагрузке на мост, а ширина (площадь) импульса характеризует площадь соприкосновения колеса машины с дорогой. Расстояние вдоль моста между двумя (тремя и более) парами импульсов пропорционально базе дорожно-транспортного средства. Аналогичное расстояние между объектами, состоящее из двух (трех или более) пар импульсов, характеризует, в другом пространстве, расстояние между реальными автомобилями. В процессе движения последнее расстояние может изменяться, что несложно промоделировать. Указанные расстояния определяются из статистических данных и для конкретного моста могут быть получены в процессе наблюдений.

Основными преимуществами предлагаемой модели являются, во-первых, простота моделирования на основе развитой теории сигналов, случайных процессов и полей, во-вторых, возможность учета автомобилей различной массы, движущихся по мосту.

Поскольку основное назначение модели – учет динамики нагрузок, то результаты расчета этих нагрузок будут носить обобщающий характер для конкретного моста, причем можно будет выделить несколько типичных ситуаций для анализа.

Итак, на основе разработанной модели можно получить случайное поле импульсных нагрузок, постоянно изменяющихся в пространстве и времени в результате перемещения автомобилей по прямым и встречным полосам. При смещении машины из одной точки в другую импульсная нагрузка значительно уменьшается, но не до нуля, поскольку существуют небольшие случайные нагрузки на мост. Интенсивность этих нагрузок зависит от конструкции моста, вида дорожного покрытия на мосту и в принятой модели может быть учтена с помощью пространственного аддитивного белого шума, амплитуда которого пропорциональна амплитуде нагрузки. Таким образом, в модели случайное поле представляет собой сумму случайного поля импульсов различной амплитуды и белого шума. Эта сумма постоян-

но меняется со временем и в пространстве, т.е. на плоскости моста.

Для оценки расстояний между импульсами можно воспользоваться связью между скоростью автомобиля V и плотностью машин на дороге. Если $\rho = 0$ (нет машин на мосту), то $V = V_{\max}$, где $V_{\max}$ – либо максимально допустимая скорость, согласно правилам уличного движения, либо максимальная скорость, находящаяся из наблюдений. Если $\rho = \rho_{\max}$ (машины касаются друг друга, расстояние между импульсами минимальное), то $V = 0$ и в результате имеем [5]

$$V(\rho) = V_{\max} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right), \quad (1)$$

при $0 \leq \rho \leq \rho_{\max}$.

Значения $V_{\max}$ и $\rho_{\max}$ задаются в математической модели исследователем.

Формула (1) не учитывает разнородности потока автомобилей по массе и габаритам. Массы m_i и размеры машин являются статистически взаимосвязанными и могут быть определены через соотношение

$$m_i = \alpha_i \cdot l_i, \quad (2)$$

где α_i – коэффициенты, определяемые из технических характеристик машин и наблюдений. Для i -го типа машины на единицу длины моста длиной приходится $\frac{l_i}{L} = \frac{m_i}{\alpha_i \cdot L}$, длины машины, т.е.

$$\rho_i = \frac{m_i}{\alpha_i \cdot L}. \quad (3)$$

Отсюда

$$\rho \cdot m_i = \rho_i \cdot \alpha_i \cdot L, \quad (4)$$

где $0 \leq \rho_i \leq 1$, $i = 1, n$, n – количество типов машин; $\rho_i = 1$ тогда, когда длина автомобиля совпадает с длиной моста (короткие мосты). При выборе массы автомобиля по формуле (2) нужно руководствоваться следующим.

Необходимо выбрать несколько основных типов автомобилей, например, легковые, грузовые, специальные машины. Среди легковых можно выделить машины малого, среднего и большого классов ($i = 1, 2, 3$). Аналогичную градацию можно провести среди других машин. Массе m_i ставится в соответствие сумма амплитуд импульсов A_i , которая характеризует распределение нагрузки, создаваемое автомобилем по осям, где n – количество амплитуд импульсов, максимальному значению которого соответствует нагрузка, создаваемая осью или (и) парой осей тяжелой машины.

Эта же машина, согласно модели, зачастую имеет наибольшую длину, которой приписывается определенное время τ_i^* , т.е. $l_i^* \rightarrow \tau_i^*$. Если расстоянию l_i отвечает время τ_i , то расстоянию между колесами соответствует время, которое примерно равно $\tau_i / 2$. Длина участка контакта колеса с дорогой δ_i также зависит от типа автомобиля и может быть получена из анализа геометрических характеристик машин. Например, если длина контакта колеса составляет β_i части длины машины (где $\beta_i < 1$), то в абсолютных единицах эта длина составит $\beta_i \cdot l_i$, а во временном пространстве $\tau_i \cdot l_i$. Аналогично находится расстояние между колесами во временном пространстве.

Длину моста можно записать в виде

$$L = \sum_{i=1}^n l_i + n\Delta, \quad (5)$$

где Δ – расстояние между автомобилями. Отсутствие индекса при Δ означает, что между машинами выбрано одинаковое расстояние, а это в большинстве случаев близко к реальному процессу движения, при этом

$$\Delta = \frac{L - \sum_{i=1}^n l_i}{n}. \quad (6)$$

В зависимости от ситуации в формуле (6) возможно деление на $(n-1)$ или $(n+1)$.

Расстоянию Δ будет соответствовать период следования импульсов T_i , который определяется из соотношения

$$\begin{aligned} l_i &\rightarrow \tau_i, \\ \Delta &\rightarrow T_i, \end{aligned} \quad T_i = \frac{\Delta \cdot \tau_i}{l_i}. \quad (7)$$

Как правило, транспортный поток состоит из нескольких типов транспортных средств, отличающихся массой, габаритами и т.д. Рассмотрим несколько типов моделей нагрузок, создаваемых различными транспортными средствами (ТС). Пусть первой моделью нагрузки транспортного средства будет автомобиль марки КамАЗ модели 65115, второй – КамАЗ модели 55111, третьей – ГАЗ-3302 («Газель») и четвертой – автомобиль «НИВА»-2141. Технические характеристики транспортных средств, которые необходимы для составления моделей, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Краткие технические характеристики транспортных средств

Марка автомобиля	Ка-мАЗ-65115	Ка-мАЗ-55111	ГАЗ-3302	Нива-2141
Количество осей	3	3	2	2
Осевая нагрузка, передний мост $P_{ПМ}$, тс	6,5	5	1,2	0,7
Осевая нагрузка, задний мост $P_{ЗМ}$, тс	2·9,25	2·7,5	2,3	0,9
Расстояние между 1-й и 2-й осями l_{1i} , м	2,8	2,8	3,2	2,2
Расстояние между 2-й и 3-й осями l_{2i} , м	1,3	1,3	–	–

Положим, что длина транспортного средства l_i во временной области τ_i определяется из отношения $\tau_i = l_i / v_i$, где v_i – скорость i -го автомобиля, амплитуде соответствует осевая нагрузка $P, [m \cdot c]$, а ширине импульса – участок контакта ТС с дорожным полотном $\delta_k = 0,2$ м. В принятой модели расстояние между автомобилями Δ , согласно СНиП 2.03.05-84, задаем равное 1,3 метра.

По принятым отношениям длины и нагрузок получим модели ТС во временном пространстве. На рис. 1 представлена модель нагрузок от автомобиля «Нива»-2141 с подвижной нагрузкой на переднюю и заднюю оси 0,9 и 0,7 [тс] соответственно. Аналогично на рис. 2, 3 представлены модели автомобилей «ГАЗ»-3302 и «КАМАЗ»-65115. Автомобили представлены на интервале времени 20 секунд, что эквивалентно $20 \cdot v_i$ метрам участка дорожного полотна мостовой конструкции. На рис. 4 представлена модель автомобиля «Нива»-2141 на фоне нормально распределенного белого гауссовского шума, что в реальном пространстве может соответствовать случайным ветровым нагрузкам, биениям волн об опоры моста, неровностям пути и т.д.

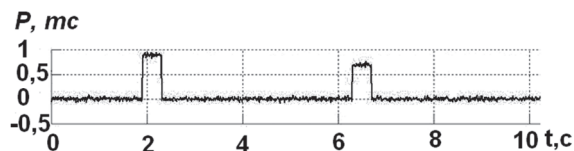


Рис. 1. Временная модель подвижной нагрузки автомобиля «Нива»-2141 на участке автомобильного моста

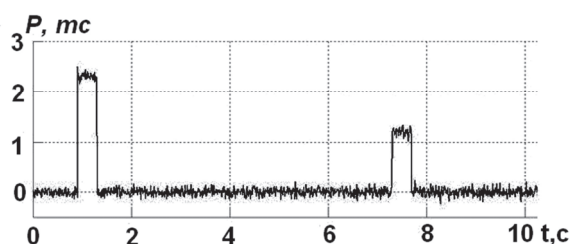


Рис. 2. Временная модель подвижной нагрузки автомобиля «ГАЗ»-3302 на участке автомобильного моста

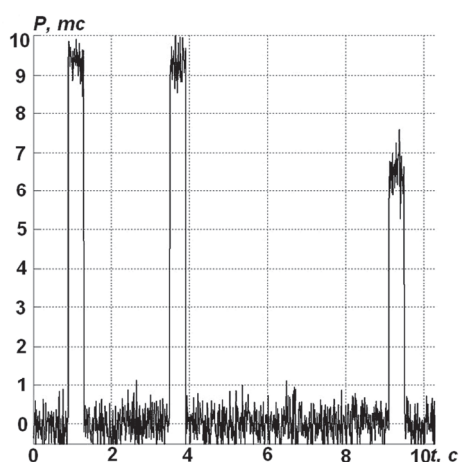


Рис. 3. Временная модель подвижной нагрузки автомобиля «КАМАЗ»-65115 на участке автомобильного моста

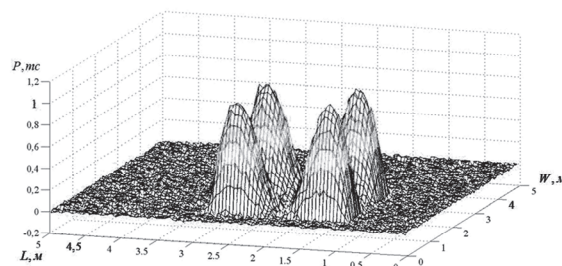


Рис. 4. Пространственная модель нагрузки автомобиля «Нива»-2141 на участке автомобильного моста

Выводы

В работе исследованы типовые модели нагрузок транспортных средств при движении по мосту, что является ценным инструментом при определении безопасных режимов нагружения при испытаниях и освидетельствовании сооружений.

Перспективным направлением является создание модели транспортного потока случайного состава при движении по заданному количеству полос проезжей части.

Литература

1. Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж: НПАОП 45.2-7.01.-97. – Введ. Постановою Кабінету Міністрів України від 05.05.1997. – <http://dnop.com.ua/dnaop>.
2. Брайловский Н. О. Моделирование транспортных систем / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. – М.: Транспорт, 1978. – 124 с.
3. Математическое моделирование автотранспортных потоков / Н. Н. Смирнов, А.Б. Киселев, В.Ф. Никитин, М.В. Юмашев. – М.: МГУ, 1999. – 96 с.
4. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хейт. – М.: Мир, 1966. – 288 с.
5. Семенов В. В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / В. В. Семенов. – М.: МГУ, 2004. – 48 с.

Рецензент: Е.Б. Угненко, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 01 августа 2012 г.